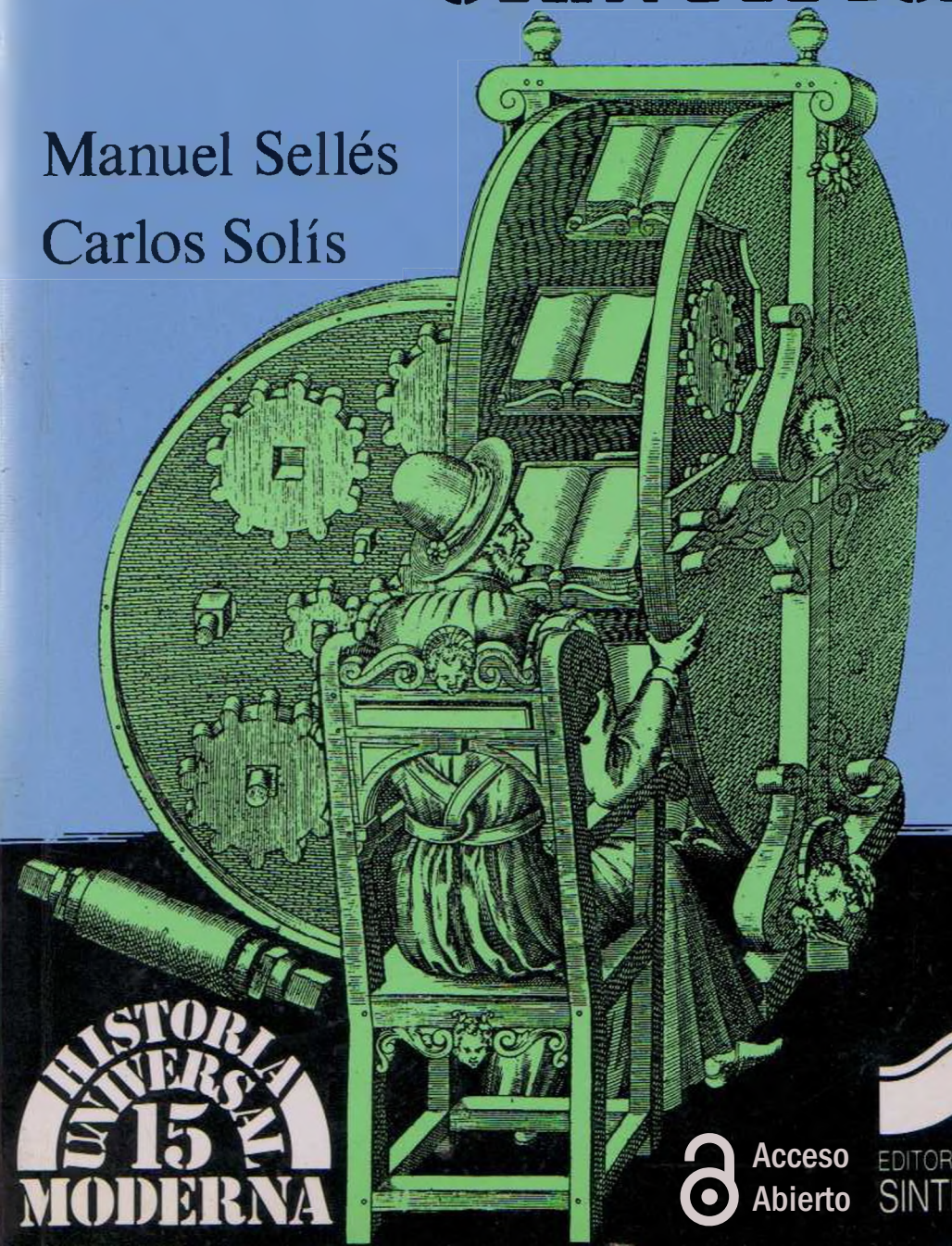
REVOLUCIÓN CIENTÍFICA

Manuel Sellés
Carlos Solís



HISTORIA UNIVERSAL MODERNA 15

Acceso Abierto

EDITORIAL SINTESIS

LA REVOLUCION CIENTIFICA

Manuel A. Sellés
Carlos Solís

EDITORIAL
SINTESIS

CREATIVE COMMONS

Diseño de cubierta: Juan José Vázquez

© Manuel A. Sellés y Carlos Solís

© EDITORIAL SINTESIS, S. A.
Vallehermoso, 32. 28015 Madrid
Teléf. (91) 593 20 98

ISBN: 84 - 7738 - 126 - 7
Depósito legal: M - 28.585 - 1991

Fotocompuesto en Textoláser, S. A.
Impreso en Lavel, S. A.
Impreso en España - Printed in Spain

Indice

Introducción 9

1. El medio cultural de la Revolución Científica 23
1.1. La invención del desarrollo 26
1.2. Geografía del desarrollo económico y científico 29
1.3. La cultura clásica: el humanismo 36
1.3.1. El neoplatonismo 37
1.3.2. El aristotelismo 39
1.4. El nacimiento de la cultura técnica 41
1.5. La profesión científica y las instituciones 43

2. El problema del movimiento 47
2.1. El movimiento en Aristóteles 47
2.2. La teoría del impetus 51
2.3. La caída de los graves 52
2.4. El problema de la latitud de las formas 54
2.5. La teoría del impetus y la caída de los graves 57
2.6. Los mecánicos italianos 58

3. La astronomía copernicana 65
3.1. La astronomía ptolemaica 66
3.2. La astronomía árabe y cristiana 74
3.3. El monstruo y el sistema 76
3.4. ¿Un árabe polaco? 77
3.5. La luz del Sol 80
3.6. Astrónomos y filósofos naturales escépticos 81
3.7. Entre dos mundos 83

4. La revolución copernicana 85
4.1. El universo de los aristotélicos 85
4.2. Un observador excepcional 86
4.3. Kepler, o la mística del cosmos 91
4.3.1. El misterio del universo 91
4.3.2. La guerra con Marte 94
4.3.3. La música de las esferas 99
4.3.4. La fuerza solar 100
4.4. Galileo y la astronomía telescópica 101

5. Una nueva física para un nuevo cosmos 105
5.1. El derribo del orden aristotélico 109
5.2. Ingeniero en Padua 112
5.3. El giro astronómico de Galileo 115
5.4. Máquinas contra magos 121
5.5. La máquina sin sortilegios 122

6. La síntesis newtoniana 129
6.1. El impacto 129
6.2. El análisis del movimiento circular 131
6.3. Las leyes de Newton 132
6.3.1. Las primeras investigaciones sobre el impacto y el movimiento circular 132
6.3.2. Los Principia 133
6.4. La atracción universal 137
6.5. El programa newtoniano 142
6.6. La otra cara del programa newtoniano y el fin del mecanicismos 144

7. La matematización de la óptica física y la estructura de la materia 147
7.1. Vuelta a los griegos 148
7.2. Otra vez los árabes 150
7.3. Las lentes y los filósofos 151
7.4. Las teorías del medio 153
7.5. Atomos y colores 157
7.6. Las entrañas de la creación 160

8. La física experimental 163
8.1. El origen de la filosofía experimental 166
8.2. Los experimentos de los matemáticos 170
8.3. Bacon y las Academias 172
8.4. La fabricación del vacío 174

9. La filosofía química y la estructura de la materia 185
9.1. La alquimia 185
9.2. La materia en Aristóteles 188
9.3. Paracelso y la química médica 188
9.4. Robert Boyle y la filosofía mecánica 191
9.5. Vuelta a los principios: el flogisto 194

10. Apéndice. Selección de textos 199

11. Bibliografía 213

Introducción

Por «Revolución Científica» se ha venido denotando, tradicionalmente, la profunda transformación del método y contenidos del saber que dio lugar, en los siglos XVI y XVII, al nacimiento de la ciencia moderna. En las últimas décadas, con el surgimiento de la historia de la ciencia como disciplina especializada y el giro historicista de los filósofos de la ciencia, este término, inicialmente vago, se ha transformado y precisado. Desde la publicación de la influyente obra de T.S.Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas* (1962), ha venido a representar (matizaciones aparte) un modelo de cambio científico en el que una concepción de la naturaleza (o parte de ella) se sustituye por otra nueva. En este sentido, se pueden encontrar a lo largo de la historia diversas revoluciones científicas de distinto orden. Tanto más cuanto que no hay acuerdo sobre las características concretas que definen operativamente lo que es una revolución en la ciencia. Así, por ejemplo, se puede hablar de la revolución copernicana, de la revolución darwinista, o de la revolución de la química industrial de tinturas textiles en la Alemania de fines del ochocientos. Sin embargo, cuando se habla de «la» Revolución Científica (con mayúscula), no cabe duda de que se hace referencia a ese proceso renovador que condujo a la construcción de la ciencia moderna.

Los trabajos clásicos de historia de la ciencia acotaron cronológicamente esta revolución entre las figuras de Copérnico y Newton, y destacaron su carácter innovador en algunos frentes: por un lado, en la astronomía, con la formulación del heliocentrismo copernicano; por otro, en la mecánica, como disciplina creada a partir del estudio de los problemas del movimiento entre los hitos de Galileo y Newton; y también en el dominio de la

anatomía y fisiología, con las aportaciones de Vesalio y Harvey. La investigación posterior, sin denegar la importancia de estos cambios, se ha extendido a la indagación de los producidos en otras disciplinas, como la química, la física experimental, y el conjunto de saberes que más tarde se aglutinará bajo la denominación de «biología». También, por otra parte, ha puesto en evidencia que los cambios científicos, por más conceptuales que sean, no se producen aislados de la influencia de otros factores externos a la ciencia, como los políticos, económicos, sociales e institucionales, que a su vez se ven influidos por ella.

Con todo esto, el estudio de la Revolución Científica se ha enriquecido mucho, y se ha complicado mucho más, de tal modo que sus límites y características inicialmente establecidos se han diluido, sin perder su importancia, en un panorama complejo que todavía dará para largos años de indagación (si es que ésta puede terminar alguna vez). Y con todo ello se ha ido poniendo de relieve, cuanto menos para algunos, que el término «Revolución Científica» debe usarse más bien como una etiqueta simbólica para denotar un proceso histórico que, como tal, constituye un tejido continuo y sin límites.

Evidentemente, el limitado alcance de esta obra, tanto en su extensión como en su carácter elemental y meramente introductorio, no puede tratar de recoger todo esto. Por ello se ha decidido acotar drásticamente sus contenidos, lo que explica que se haga escasa o nula referencia a las ciencias de la vida, o que en el caso de la química se esboze un panorama breve que no incluya la llamada «revolución química» efectuada por Lavoisier a fines del setecientos. Por otra parte, sólo se tratan algunos de los temas más destacados. Con todo ello se ha buscado eludir en lo posible lo que de otro modo hubiese sido una larga lista de nombres, fechas y logros en favor de la comprensión, inevitablemente a nivel elemental, de las cuestiones intelectuales más importantes. En esta línea, también se ha acotado notablemente la bibliografía recomendada para una mayor profundización. A través de ella y de la en ella citada, sin embargo, el lector interesado podrá ingresar en el no muy nutrido grupo de los curiosos que se interesan por estos interminables temas.

Año	General	Astronomía	C. Físicas	Química y C. de la vida
1418	Enrique el Navegante funda una escuela de navegación en Sagres.			
1454	Gutenberg empieza a imprimir.			
1472		Regiomontano acaba la traducción, resumen y aclaración de las teorías de Ptolomeo en el *Epítome*, comenzado por Peurbach.		
1492	Rendición de Granada. Descubrimiento de América.			
1514		Nicolás Copérnico escribe la primera versión del *De revolutionibus*, que publicará póstumamente en 1543.		
1517	Carlos I en España.			
1522	Elcano finaliza la circunnavegación del globo iniciada por Magallanes.			

Año	General	Astronomía	C. Físicas	Química y C. de la vida
1530	Francisco I funda el Collège de France.			Paracelso publica su *Paragranum*, sugiriendo el uso de remedios medicinales de origen mineral.
1537			Se publica *Della nova scientia* de Niccolò Tartaglia, con el que se inaugura la ciencia de la balística.	
1540	Sublevación de Gante	Rético publica un avance del *De revolutionibus*.		
1543		Se publica el *De revolutionibus* de Copérnico		Vesalio publica el *De humani corporis fabrica*.
1545	Concilio de Trento			
1551		Erasmus Reinhold publica unas tablas astronómicas basadas en la teoría de Copérnico		
1553				Miguel Servet descubre la circulación pulmonar de la sangre.
1556				Se publica *De re metallica* de Agricola.

Año	General	Astronomía	C. Físicas	Quimica y C. de la vida
1561				*Observationes anatomicae* de G. Fallopio.
1568	Proyección de Mercator.			
1572	Noche de San Bartolomé. El Duque de Alba fracasa en los Países Bajos.	Tycho Brahe observa la aparición de una nueva estrella. Su *De nova stellae* se publicará al año siguiente.		
1575	Felipe II funda en Madrid la Academia de Matemáticas.			
1576			R. Norman descubre la inclinación magnética.	
1577	F. Drake circunnavega el mundo.	Tycho Brahe calcula la paralaje del cometa aparecido ese año y concluye que es un fenómeno supralunar.		
1584	Guerra entre Felipe II e Isabel de Inglaterra.	Giordano Bruno. desde una posición mística. defiende el sistema copernicano y la idea de que las estrellas son soles rodeados de planetas.		

Año	General	Astronomía	C. Físicas	Química y C. de la vida
1585	A. Farnesio toma Amberes. W. Raleigh coloniza Virginia.		Giovanni Battista Benedetti publica una obra criticando las concepciones aristotélicas sobre el movimiento. S. Stevin comprueba la caida de los graves.	
1589	Los ingleses atacan Lisboa y La Coruña. Asesinato de Enrique III.			Se inicia la primera edición completa de las obras de Paracelso.
1590			Galileo redacta el *De motu*.	
1592	Johannes Kepler publica el *Mysterium cosmographicum*	Galileo inventa el termómetro		
1594	Mapier inventa los logaritmos.			
1596		D. Fabricio descubre Mira, la primera estrella variable		
1597				*Alchemia* de Libavio.
1600	G. Bruno es quemado por hereje		William Gilbert publica el *De magnete*.	
1602	Es fundada por los holandeses la Compañía de las Indias Orientales.	Se publica póstumamente la *Astronomiae instauratae progymnasta* de Tycho Brahe, editada por Kepler.		

Año	General	Astronomía	C. Físicas	Química y C. de la vida
1603	Se funda en Roma la Accademia dei Lincei			
1604		Kepler observa una nueva estrella en la constelación de Ofiuco: la describirá dos años después en su *De stella nova.*	Kepler publica su *Ad vitellionem paralipomena.*	
1609	Expulsión de los moriscos	Kepler publica la *Astronomia nova*	Galileo construye su primer telescopio.	
1610	Asesinato de Enrique IV	Galileo publica el *Sidereus nuncius.*		
1611		Kepler describe en su *Dioptrice* el telescopio astronómico.		
1613		Galileo publica su estudio sobre las manchas solares.		
1619		Kepler publica el *Harmonice mundi.* También el *Epitome astronomiae Copernicanae.*		
1620	F. Bacon publica el *Novun organum*			
1621	Muerte Felipe III y accede al trono Felipe IV		W. Snell descubre la ley de la refracción.	

Año	General	Astronomía	C. Físicas	Química y C. de la vida
1627		Kepler publica las *Tablas Rudolfinas.*		
1628				W. Harvey publica *De motu cordis* demostrando la circulación sanguínea.
1632			Galileo publica el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo.* defendiendo las ideas copernicanas.	
1635			H. Gellibrand publica el descubrimiento de la declinación magnética.	
1637	Aparece el *Discurso del método* de Descartes, seguido de los *Meteoros*, la *Dióptrica* y la *Geometría.*			
1638			Se publican las *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias* de Galileo.	
1639		J. Horrocks observa el primer tránsito de Venus por el disco solar		

Año	General	Astronomía	C. Físicas	Química y C. de la vida
1640			Evangelista Torricelli publica su *De motu gravium*, aplicando a los fluidos la mecánica galileana.	
1643			Torricelli construye el primer barómetro de mercurio.	
1644			Se publican los *Principios de filosofía* de Descartes, donde aparece la teoría de los vórtices.	
1647		*Selenografía* de J. Hevelius.		
1648			Périer sube al Puy de Dôme al servicio de Pascal.	Se publica el *Ortus medicinae* de Van Helmont.
1649	Inicio de la Commonwealth		En su *Syntagma philosophiae*, Pierre Gassendi defiende la existencia de los átomos.	
1650		G. B. Riccioli observa Mizar con el telescopio, y descubre la primera estrella doble.	O von Guericke construye la primera bomba de vacío.	M. Malpighi aplica el microscopio a estudios anatómicos.
1656			Huygens desarrolla el reloj de péndulo	

Año	General	Astronomía	C. Físicas	Química y C. de la vida
1657	Se funda en Italia la Accademia del Cimento			
1658				J. Swammerdam descubre los glóbulos rojos.
1660	Se funda la Royal Society. Restauración monárquica.			
1661	Se empieza a publicar la *Gazeta de Madrid.*			Se publica *El químico escéptico* de R. Boyle.
1664	Los ingleses conquistan Nueva York (antes Nueva Amsterdam).		Se publica póstumamente *El mundo* de Descartes, donde se defiende la teoría copernicana.	
1663		J. Gregory proyecta el primer telescopio reflector viable.		
1665	Comienza la publicación de las *Philosophical Transactions,* revista de la Royal Society. En Francia se funda el *Journal de Savants.*		Robert Hooke publica la *Micrografía.* Se publica el descubrimiento de la refracción por Grimaldi.	R. Lower inicia la técnica de transfusiones de sangre.

Año	General	Astronomía	C. Físicas	Química y C. de la vida
1666	Se funda en París la Académie des Sciences. Gran fuego de Londres.			Boyle defiende una filosofía química de corte corpuscular en su *Origen de las formas y cualidades.*
1667	Se funda en Paris el Observatorio de la Académie des Sciences.	Se introduce el micrómetro en astronomía.		J. Ray inicia su flora de las Islas británicas.
1668				F. Redi ataca experimentalmente la generación espontánea. R. de Graaf descubre la estructura de los testículos y luego la de los ovarios.
1669				Becher formula su teoría química.
1671		J. Picar publica la longitud de un grado de meridiano.		
1673			En su *Horologium oscillatorium,* C. Huygens publica la ley de la fuerza centrípeta.	
1675	Se funda el Observatorio Real de Greenwich			Nicolás Lémery publica su *Cours de Chymie.*

Año	General	Astronomía	C. Físicas	Química y C. de la vida
1676			O. Römer anuncia su cálculo de la velocidad de la luz.	
1677				A. van Leeuwenhoek descubre animales unicelulares.
1679			E. Bartholin descubre la doble refracción del espato de Islandia.	
1680			D. Papin desarrolla la primera «olla a presión».	Se publica el *De motu animalium*, donde G. A. Borelli aplica el mecanicismo a los seres vivos.
1682	Se funda en Leipzig otra revista científica, las *Acta eruditorum*.			
1686	Liga de Augsburgo.	Se publican los *Entretiens sur la pluralité des mondes* de Fontenelle, donde se divulgan los vértices cartesianos y se defiende la idea de la pluralidad de los mundos habitados.		
1687			Se publican los *Principia* de I. Newton	

Año	General	Astronomía	C. Físicas	Química y C. de la vida
1692			C. Huygens publica el *Tratado de la luz.*	
1697				G. E. Stahl introduce la teoría del flogisto.
1698	F. Savery inventa una bomba de agua accionada por vapor.			
1700	Leibniz convence a Federico I de Prusia para que funde la Academia de Ciencias de Berlín. La casa de Borbón en España con Felipe V.			
1704	Toma de Gibraltar.		Se publica la *Optica* de Newton.	
1705		E. Halley identifica el cometa que lleva su nombre.	F. Haubskee inicia experimentos de electricidad en la Royal Society.	
1712	Máquina de vapor de Newcomen para achicar el agua de las minas. Felipe V funda la Biblioteca Real (actual Biblioteca Nacional).			

1.

El medio cultural de la Revolución Científica

A los científicos y a los filósofos les gusta pensar que la ciencia produce conocimientos. Tal vez sea cierto, pero para los historiadores y el público general la ciencia produce cohetes espaciales, bombas atómicas y vídeos. Así pues, sus rasgos más visibles y relevantes son económicos, políticos y militares. Con todo, este carácter globalmente práctico de la ciencia es muy reciente, de los dos últimos siglos. Durante los dos mil años anteriores al 1600, la actividad científica poseía una muy escasa influencia sobre la infraestructura social, razón por la cual (con la comprensible excepción de la medicina y a veces de la astrología) podía dejar de practicarse sin graves efectos según el capricho de los príncipes o el gusto errático de los ciudadanos ociosos. El impacto de la ciencia sobre el conjunto de la sociedad era entonces despreciable, mientras que hoy día estamos acostumbrados a que el desarrollo científico sea tan importante como para que nuestra civilización no pueda subsistir sin él.

¿Cuándo cambió esta relación? Ya en el siglo XVIII el modo científico de proceder se asoció íntimamente con la industria, la cual durante siglos había estado en manos de artesanos tan hábiles como iletrados. Esa asociación fue posible merced a los cambios profundos que experimentó la ciencia durante los dos siglos anteriores, lo que se ha dado en llamar la Revolución Científica. Tales cambios fueron inducidos por la aparición de un modelo de sociedad que tuvo a bien uncir la ciencia al carro del desarrollo económico. Desde los buenos y viejos tiempos clásicos, la ciencia se tenía por una actividad liberal contemplativa, sin conexión con las prácticas artesanales. Con todo, en el Renacimiento algunas pocas aplicaciones útiles de

la ciencia pasaron a primer plano como indicios de sus enormes potencialidades para resolver problemas nuevos nunca antes abordados ni soñados.

A partir del Renacimiento, merced al auge mercantil y comercial asociado a la expansión europea, los problemas proliferaron con mayor rapidez de la que tenían para abordarlos los esquemas medievales, jerarquizados y estables. Eran tiempos revueltos. El contraste entre el orden medieval y el desorden moderno podrá calibrarlo el lector comparando los mundos reflejados, más allá de la trama, en dos excelentes novelas, *El nombre de la rosa* de U. Eco y el *Opus nigrum* de M. Yourcenar, pues una buena novela vale más que un libro de historia, aunque sea tan bueno como éste que tienes en tus manos, amable lector.

La decadencia de las superinstituciones medievales, el Imperio y el Papado, contrastaba con el auge de la burguesía ciudadana que irrumpió con nuevos intereses y valores, cuya expresión teológica (la teología no por abstracta es menos práctica) desgarró la unidad europea con guerras de religión. Tras ella estaban diversos modelos de estado moderno, como las monarquías española e inglesa. Los méritos de ambas a la hora de asumir el desarrollo técnico se vieron simbólicamente en 1588, cuando la paradójica Armada Invencible, compuesta por lentos galeones trasatlánticos lanzados al viejo sistema de abordaje, fue derrotada por barcos más marineros que luchaban a cañonazos sin permitir el contacto. Habiendo desarrollado una cureña que hacía fácil la recarga, disponían de una cadencia de fuego muy superior, pues tras la primera andanada los cañones católicos enmudecían. Y eso sin mencionar su deficiente perforación y fundición.

A la agitación interna europea se sumaba el cambio de esquema geográfico. Por Oriente, el turco llegaba a Constantinopla (1453) y asediaba Viena (1529), poniendo fin al antiguo Imperio y a la llegada de manuscritos y eruditos bizantinos. Por Occidente, portugueses y españoles descubrieron campos que los antiguos ni siquiera imaginaran, desbordando los patrones técnicos, financieros, antropológicos e ideológicos anteriores.

Así pues, el nuevo orden europeo, inestable y fluido, dependía comercial y militarmente de dos tecnologías paradigmáticas, la navegación oceánica y el cañón. Ellas fueron de importancia primordial para promover la ciencia a la categoría de actividad social necesaria. Cuando se navegaba por el Mediterráneo, en el que es difícil pasar mucho tiempo sin avistar puntos reconocibles de la costa, cualquier piloto viejo y tuerto valía más que Einstein; pero las cosas cambiaban a la hora de surcar el océano. Hallar el rumbo y la hora exigía mirar la aguja y el cielo; pero sobre todo determinar la latitud y la longitud suponía recurrir a conocimientos astronómicos e instrumentos matemáticos. Aparecieron academias e instituciones promovidas por el reconocimiento de la importancia práctica de las matemáticas y la astronomía, ciencias bien desarrolladas desde la Antigüedad, cuando apenas habían servido (placer intelectual aparte) para hacer mejores calenda-

Figura 1.1. Matemáticas prácticas y artillería. (Agostino Ramelli, *Le diverse et artificiose macchine*, Paris, 1588.)

rios y horóscopos. Esta fue la *vía matemática y mecánica* de la nueva ciencia.

Pero, al mismo tiempo, el cañón entonaba su canto áspero y la brújula marcaba su enigmático rumbo sin que existiera una química ni una física que ayudase a su control, al modo en que las matemáticas habían hecho con la navegación. Algunos decidieron que los debates de los matemáticos copernicanos y ptolemaicos eran una pérdida de tiempo, mientras que la pólvora y sus efectos mágicos (la magia natural es el arte de conseguir grandes efectos de causas insignificantes) no había recibido la atención de los filósofos naturales. Y con la pólvora estaban los procesos metalúrgicos y mineros, especialmente valorados debido a la multiplicación por un factor de cinco a diez de la magnitud de los ejércitos en los que la artillería tenía una función primordial. Esta fue la base de la *clave química* de las nuevas ciencias del fuego, mucho más radicales y revolucionarias que la *vía matemática* por cuanto que carecían de antecedentes clásicos y debían partir de cero mediante la experimentación y la búsqueda de esquemas conceptuales heterodoxos como el hermetismo y la magia, continuos con el espíritu fáustico de los nuevos tiempos.

A la vez, la información y comunicación florecieron con el desarrollo de la imprenta y la educación. Los protestantes lanzaron campañas de alfabetización para fomentar la lectura de la Biblia, los jesuitas organizaron escuelas y los reformadores como Moro, Vives o Comenio desarrollaron esquemas educativos. Las gafas, que se habían inventado en el siglo XIII, eran en el XVI un adminículo usual en las narices europeas. Los artesanos empezaron a leer e incluso a escribir libros y los eruditos universitarios repararon en la aplicabilidad práctica del saber para beneficio de la humanidad. Las universidades reaccionaron positivamente, especialmente en el campo médico, y allí donde su adaptación era más difícil, como en las ciencias herméticas y matemáticas, aparecieron nuevas academias e instituciones científicas que ampliaron las oportunidades profesionales de los científicos. En este capítulo atenderemos a las transformaciones sociales e intelectuales en que se habrá de desenvolver la nueva ciencia.

1.1. La invención del desarrollo

Hacia el año 1000 Europa era una zona deprimida en comparación con Bizancio o el Islám; pero en el siglo XV, y a pesar de la importancia del Imperio turco, la situación se había invertido. Los cristianos, no más de un quinto de la población del globo, iniciaron la marcha hacia el sistema económico mundial expandiéndose a Occidente por el océano y al Oriente por las estepas continentales, movidos por un dinamismo nunca visto: habían descubierto el valor de la innovación en el campo comercial y manufacturero, lo cual tendría consecuencias sobre las demandas hechas inmediata-

mente a la tecnología y posteriormente a la ciencia. Se había inventado el *valor* de inventar.

Durante el siglo XV se extinguió paulatinamente la servidumbre, dando lugar en el campo a aparceros que pagaban una renta; en las ciudades los gremios cedieron ante capitalistas individuales, liberalizando las restricciones a la producción. El aumento de asalariados libres, unido al crecimiento de la población, que pasa de 80 millones en 1500 a 105 en 1600, disparó la demanda de bienes manufacturados y de servicios profesionales, aunque inicialmente sólo eran accesibles a una minoría, pues el común de los mortales estaba muy ocupado tratando simplemente de mantener unidos alma y cuerpo. El 90 % de la demanda por encima de la subsistencia correspondía a la exigua clase burguesa, y ella marcaba la pauta; aunque, exceptuando Florencia y Flandes, fuese inusual encontrar centros manufactureros con medio millar de trabajadores, la tendencia estaba esbozada.

Por el momento la mayor demanda correspondía a los estados, pues las oposiciones nacionales, tanto comerciales como militares, crearon grandes necesidades en el terreno naval y metalúrgico. Los ejércitos se decuplicaron entre el XV y el XVI, y el trote que recibe su equipo contribuyó a aumentar esa demanda, lo cual explica la aparición de grandes banqueros como los Fugger o los Welser en la minera Alemania del sur, o las grandes fortunas de los industriales del armamento, como los de Geer, Tripp o De Beche, especialmente en los Países Bajos, preponderancia que pasó, entrado el XVII, a Inglaterra y Suecia.

La iniciativa nacional movilizó enormes capitales para armar flotas ultramarinas. La Compañía de las Indias Orientales holandesa apareció a finales del XVI, seguida a comienzos del XVII por la inglesa mucho menos importante, si bien en las Occidentales dominaba Inglaterra. La política mercantilista que gravaba la exportación de materias primas y favorecía su importación desembocó a mediados de siglo en las guerras entre Inglaterra y Holanda que ahogaron la hegemonía de ésta. Sin salida hacia las Indias, pero con un mercado interno casi cuatro veces el inglés, la Francia de Colbert se orientó a proteger y desarrollar sus manufacturas. Eliminadas de la competición desde 1600 España y la Italia del Norte, estancada luego Holanda a partir de 1650, Francia e Inglaterra comenzaron a perfilarse como las grandes rivales que serían en el XVIII. Pero dejemos el patrón geográfico del desarrollo económico para el apartado siguiente, llamando aquí la atención sobre sus efectos intelectuales.

El desarrollo renacentista fue más mercantil y financiero que industrial; pero, aunque no se debe exagerar la magnitud del desarrollo manufacturero, su importancia fue enorme. En realidad la industria se alimentó de desarrollos tecnológicos medievales, como el alto horno que licúa plenamente el metal, dando lugar al colado, y clásicos, como las viejas máquinas simples, polipastos, grúas, bombas impelentes y sus combinaciones. Lo real-

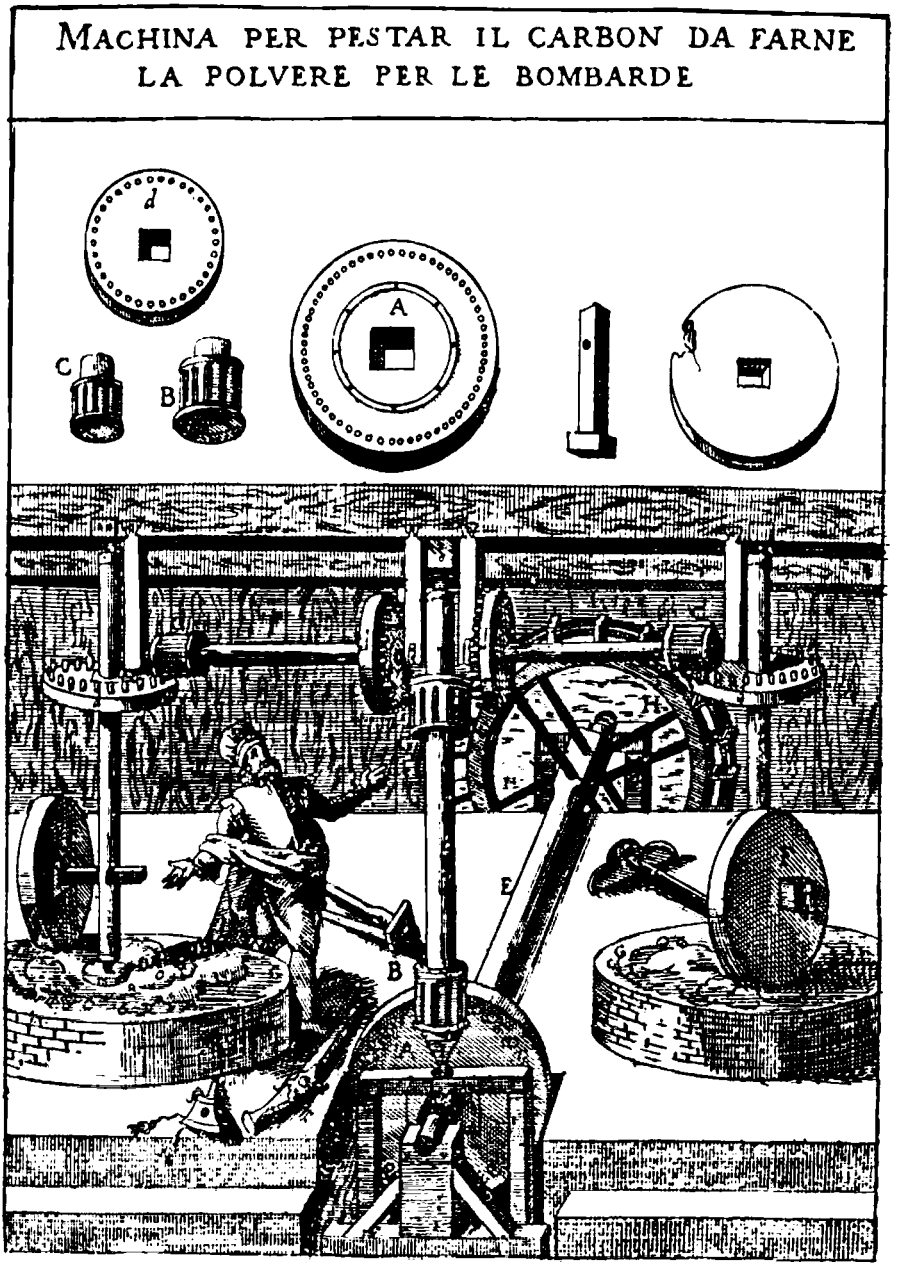


Figura 1.2. Energía hidráulica aplicada a máquinas industriales. (Vittorio Zonca. *Novo teatro di machine et edificii per varie et sicure operationi*, Padua, 1607.)

mente nuevo fue la planificación de su uso organizado al servicio de la producción para el mercado. Las fuentes de energía no animal, ruedas hidráulicas o molinos de viento, se acoplaron a mecanismos transformadores, batanes, bombas o fuelles, que ahorraban trabajo y aumentaban la productividad. Aunque inicialmente se aplicaron casi exclusivamente a la minería, especialmente la de metales preciosos, constituyeron el suelo en el que creció el espíritu de *Fausto*, la borrachera del poder transformador y mágico (dicho sin metáfora) del saber, y las ideologías prácticas que insistían en el dominio de la naturaleza en bien de los ciudadanos. Las filosofías de carácter mecánico-corpuscular son, no menos que las de raigambre químico-hermética, la respuesta intelectual a la percepción de una realidad social nueva y fascinante: el desarrollo material aportado por la técnica.

1.2. Geografía del desarrollo económico y científico

Decía Bertoldt Brecht que el hombre lo que quiere es su pan. Después puede fumar un purito y luego, si acaso, escuchar a Mahler, leer a Wordsworth o interesarse por los agujeros negros. Mientras una población se mantiene en niveles de subsistencia, no cabe esperar que dedique muchos individuos y esfuerzos a actividades de los últimos tipos, cosa que sí ocurrirá con un aumento de excedentes capaz de liberar a un número creciente de ciudadanos de las tareas más imprescindibles para la supervivencia. Si además se barrunta que algunas de aquellas actividades pueden servir para mejorar los rendimientos, miel sobre hojuelas. Eso ocurrió con la ciencia desde el Renacimiento.

Cuadro de los principales renacentistas

Aparecen en cursiva los más importantes científicamente. Obsérvese la precocidad de los italianos y su abrumadora preponderancia hasta el siglo XVII. El efecto sería aún mayor si se hubiesen incluido en su columna los personajes de otras nacionalidades que se educaron y trabajaron en Italia. Siguen en importancia los países alemanes del Imperio Germánico (entre los que se cuentan regiones centroeuropeas como Suiza, Austria, Bohemia, Alsacia, Moravia, Silesia, etc., pero no los Países Bajos que merecen mención aparte). Inglaterra comienza a mostrar signos de desarrollo científico en el último cuarto del siglo XVI, mientras que España y Portugal, representadas aquí con generosidad, decaen claramente a partir de dicho siglo, no experimentando el general aumento de personalidades que se da en los otros lugares a media que se avanza hacia el siglo XVII. (Los efectos de la Inquisición española se empiezan a hacer sentir drásticamente a mediados del XVI, cuando, por ejemplo, dejan de comprarse libros en la Universidad de Salamanca). La situación en Francia no es inicialmente muy notable, a pesar de su importancia en siglos venideros (especialmente el dieciocho). Es considerable la contribución de los Países Bajos, pues, a pesar de su pequeñez, presentan una cantidad de científicos importantes superior a la de Inglaterra.

La población europea hacia 1500 se estima en 81.800.000 habitantes, de los cuales 10.000.000 son italianos; 12.000.000 alemanes; 4.500.000 de las islas británicas; 9.300.000 de la península Ibérica; 1.900.000 de los Países Bajos, y 16.400.000 franceses.

CUADRO I

S	Italia	Alemania	Inglaterra	Iberia	Países Bajos	Francia	Otros
XIV	Petrarca, F. (1304-1374) Blas de Parma (1350-1416) Brunelleschi (1379-1446) Toscanelli, P. (1397-1482)			Crescas, H. (1340-1410)			Chrisoloras, M. (1355-1415) —griego—
XV	Alberti (1404-82) Martiani, G. (?-1483) Valla, G. (1430-1499) Ficino, M. (1433-99) Verrochio, A. (1435-88) *Pacioli, L.* (1445-1514) *Leonardo da Vinci* (1452-1519) Novara, D. M. (1454-1504) Berengario da Carpi (1460-1530) Pomponazzi, P. (1462-1525) Achillini, A. (1463-1512) Pico de la Mirandola, G. (1463-94) Maquiavelo, N. (1469-1527) Nifo, A. (1469-1538) Berengario, J. (1470-155) Fracastoro, G. (1478-1553) Calcagnini, C. (1479-1541) *Biringuccio, V.* (1480-1539) Scaliger, J. C. (1484-1558) Maurolico, F. (1494-1575)	*Cusa, N.* (1401-1464) *Peurbach, G.* (1423-1461) Walter, B. (1430-1504) *Regiomontano* (1436-76) Brunschwig, H. (1450-1512) Behaim, M. (1459-1507) Rülein, v. von Calw (1465-1523) Durero, A. (1471-1528) Agrippa, H. C. (1486-1535) Hartmann, G. (1489-1564) *Agricola* (1490-1555) *Paracelso (1493-1541)* Apiano, P. (1495-1552) Osiander, A. (1498-1552)	Linacre, I. (1460-1524) Moro, T. (1474-1535)	Zacuto, A. (1450-1522) León Hebreo (1460-1535) Coronel, L N. C. m. 1531) Ciruelo, P. (1470-1554) Oviedo, G. H. (1478-1557) Juan de Celaya (1490-1558) Vives, L. (1492-1540) Monardes, N. (1493-1588) Domingo de Soto (1494-1570) Laguna, A. (1495-1560) Bernardino de Sahagún (1499-1590)	Erasmo, D. (1467-1536)	D'Etaples (1455-1536) Rabelais, F. (1494-1553) Finé, O. (1494-155) Fernel, J. (1497-1558)	Copérnico, N. (1473-1543) —polaco—
	Tartaglia, N. (1500-57) *Cardano, G.* (1501-76) Mattioli, P. A. (1501-77) Amici, G. B. (1502-38) Piccolomini, A. (1508-1578)	*Fuchs, L.* (1501-1566) Guinther, J. (1505-1574)		Núñez, P. (1502-78) Santa Cruz, A. (1505-1567) Salinas, F. de (1508-80)	Gemma Frisius (1505-74)	Rondelet, G. (1507-66)	

	Commandino. F. (1509-75)			Servet. M. (1511-53)		*Paré. A. (1509-90)*	
		Reinhold. E. (1511-53)	Recorde. R. (1510-58)	Lusitanus. A. (1511-1568)	*Mercator. G. (1512-94)*	*Palissy. B. (1510-89)*	
	Telesio. B. (1509-88)						
	Canano. G. (1515-79)	*Rètico. G. J. (1514-74)*					
		Gesner. K. (1516-65)	Digges. L. (1515-1570)	Gómez Pereira (m. 1558)	*Vesalio. A.* (1514-1565)	De Foix. F. (1512-94)	
	Colombo. R. (1516-59)				Wier. J. (1515-88)	Ramus. P. (1515-72)	
	Cesalpino. A. (1519-1603)			Hernández. F. (1517-78)		Belon. P. (1517-64)	
	Aldrovandi. U. (1522-1605)						
	Fallopio. G. (1523-1662)						
	F. d'Acquapendente (1523-62)		Dee. J. (1527-1608)	Vallés. F. (1524-1592)			
	Patrizzi. F. (1629-1597)			Huarte de San Juan. J. (1526-1588)	Clusius. C. (1526-1609) Ortelius. A. (1527-94)		
	Bombelli. R. (1530-72)						
	Benedetti. G. B. (1530-90)	Ercker. L. (1530-94)		Valverde. J. (fl. 1552)			
	Ramelli. A. (1531-1590)						
XVI	Zabarella. J. (1533-89)	Camerarius. Jr. (1534-1598)		Zúñiga. D. de (1536-89)	Lobelius. M. (1538-1616)	Montaigne (1533-95)	
				Acosta. J. de (1539-1600)		Viète. F. (1540-1603)	
	Della Porta. G. (1534-1615)	*Clavius. C.* (1537-1612)					
		Libavius. A. (1540-1616)	*Gilbert. W.* (1540-1630)		*Stevin. S.* (1548-1620)		Brahe. T. (1546-1601) —danés—
	Monte. G. del (1545-1607)	Rothmann. C. (?-1608)	Digges. T. (1545-1595)				
	Bruno. G. (1548-1600)			Sánchez. F. (1550-1623)		Beguin. J. (1550-1620)	
	Cremonini. C. (1550-1631)	Bauhin. G. (1550-1624)	*Napier. J.* (1550-1617)				
	Valerio. L. (1552-1618)	*Maestlin. M.* (1550-1631)	Norman. R. (?-1596)	Villalpando (1552-1609)			
	Baldi. B. (1553-1617)		*Harriot. T.* (1560-1621)				
	Santorio. S. (1561-1636)		Wright. E. (1561-1615)		Hondius. J. (1563-1611)		
			Bacon. F. (1561-1626)				
			Briggs. H. (1561-1630)		Blaeu. W. (1571-1638)		
	Galilei. G. (1564-1642)						
	Zonca. V. (1568-1602)	Valentin. B. (fl. 1599-1624)			*Van Helmont* (1577-1644)		
	Campanella. T. (1568-1639)	*Kepler. J.* (1571-1630)					
		Sennert. D. (1572-1637)	Fludd. R. (1574-1637)		*Snel. W.* (1580-1626)	Peiresc. N. (1580-1637)	
		Scheiner. C. (1573-1650)	*Oughtred. W.* (1574-1660)		Jung. J. (1587-1657)	*Mersenne. M.* (1588-1648)	
	Neri. A. (1576-1614)	Boeme. J. (1575-1624)					
	Castelli. B. (1578-1643)		*Harvey. W.* (1578-1657)		*Beckman. I.* (1588-1637)	*Desargues. G.* (1591-1661)	
	Aselli. G. (1581-1620)		Gunter. E. (1581-1626)				
	Cavalieri. B. (1598-1747)					*Gassendi. P.* (1592-1655)	
	Riccioli. G. B. (1598-1671)	Marci. M. (1595-1667)	Gellibrano. H. (1597-1636)			*Descartes. R.* (1596-1650)	

Los cuadros incluidos en esta sección son ejemplos cualitativos en los que los personajes se han seleccionado a ojo, sin criterios de muestreo bien especificados. Pero no por ello son menos ilustrativos del desplazamiento conjunto de las áreas de mayor actividad económica e intelectual.

Portugal y España iniciaron en el XV exploraciones oceánicas que dieron una buena cantidad de oro y plata. Por eso fueron pioneras en la organización estatal de centros técnicos, como la desconocida Escuela de Sagres a comienzos del XV, la Junta de Matemáticos del Juan II de Portugal (1480), la Casa de la Contratación (1508) o a la Academia de Matemáticas de Felipe II (1582), adelantándose en uno o dos siglos a esquemas comparables en otras partes de Europa. Por desgracia, el modo de obtener oro americano no llevó a desarrollar las finanzas, manufacturas y comercio, sino a comprar bienes y servicios a otros países, contribuyendo al auge de Italia, Francia, Holanda y Alemania. Peor aún, el modelo castellano de explotación estatal y su ideología contrarreformista llevaron a Felipe II a librarnos de pecaminoso influjo europeo, prohibiendo la libre circulación de libros e ideas, así como la salida de estudiantes al extranjero (1559), precisamente cuando se iniciaba la Revolución Científica. Todo ello, unido a la depresión de principios del XVII, explica nuestra ausencia del panorama científico en dicho siglo crucial.

Desde los tiempos del buen Marco Polo hasta finales del XVI, las ciudades del norte de Italia desarrollaron las manufacturas textiles, así como el comercio y las técnicas financieras, alcanzando el esplendor en la arquitectura y el arte que todo buen turista ha padecido. Ello se refleja en el dominio absoluto del número de científicos italianos hasta el estancamiento del XVII. El espíritu de libre empresa comercial chocó con la presencia militar en la zona del conglomerado castellano-papista. Las guerras mantenidas en su suelo en la primera parte del XVI entre España, Francia y Alemania supusieron una considerable destrucción de capital y mano de obra. Esta se encareció, fortaleciendo los gremios, con lo que disminuyeron las innovaciones y los precios subieron con pérdida de competitividad. Tras un veranillo de San Martín en la segunda mitad del XVI, la peste de 1630 acabó con un cuarto de la población, reproduciendo las consecuencias del encarecimiento de la mano de obra y sumiendo a Italia en medio siglo de depresión seguida de estancamiento. Si se suma el Concilio de Trento, con sus secuelas sobre la libertad individual, la condena de Galileo y el aumento de las cátedras de teología frente a las de matemáticas, se comprenderá la recesión científica del XVII.

Todavía en 1600 la mitad de la población europea, de unos 100 millones, se concentraba en el área mediterránea. A partir de entonces se inicia un desplazamiento hacia el norte. Los Países Bajos y Alemania eran zonas desarrolladas desde el XIII. Baste recordar la Liga Hanseática de ciudades dedicadas al comercio entre el Nordeste europeo y el Mediterráneo entre el

XIII y el XV; o las mencionadas ciudades mineras del sur de Alemania dedicadas al comercio de armamento a comienzos del XVI. El caso holandés fue espectacular porque con un exiguo 3 % de la población (frente a casi el 18 % de Francia o el 13 % de Alemania) se convirtió entre 1550 y 1650 en la primera potencia industrial y mercantil. Vencer las dificultades geográficas del país llevó a desarrollar una agricultura y pesca (arenques y ballenas) avanzadas. Pero la mayor dificultad inicial, la falta de materias primas, se convirtió en bendición al obligarlos a concentrarse en la transformación industrial de materias importadas, lo que de paso desarrolló la industria naval. Sus astilleros, con una producción potencial de mil naves al año, los dotó de una flota que representa el 75 % del total europeo, frente al 20 % inglés o al 2,5 % francés. Asimismo, la escasez de mano de obra obligó a mecanizar el trabajo. Sus molinos fueron la primera introducción masiva de motores no biológicos, aumentando la productividad y bajando los precios, tendencia acrecentada por la decisión de obtener beneficios por volumen de ventas, en detrimento de las pañerías italianas.

La destrucción española de las Provincias del Sur desplazó hacia el Norte el capital humano representado por los valones con el saber hacer y el espíritu emprendedor capitalista. A principios del XVII los valones poseían la mitad de los mayores depósitos bancarios de Amsterdam, poniéndose en práctica técnicas capitalistas modernas como la bolsa. En correspondencia, el número de científicos holandeses compite airosamente con los de Italia y Alemania cuyas poblaciones eran más de cuatro veces superiores.

La escasez de población y recursos primarios pusieron a Holanda en posición débil en la competencia con sus rivales. La política proteccionista

Cuadro de los principales científicos (no ya intelectuales en general, como en el anterior) nacidos en el siglo XVII, clasificados por nacionalidades y seguidos de una indicación de las principales áreas de actividad.

En algunos casos, la clasificación es un tanto arbitraria, como cuando un científico de origen nacional X, nace en el país Y, se forma en el Z y ejercen el W. La clave de las disciplinas es la siguiente: A (astronomía), An (anatomía), B (biología), Bt (botánica), F (física), Fi (filosofía de la ciencia), Fs (fisiología), G (geología), H (historia natural), M (matemáticas) Md (medicina), O (organización, difusión científica), T (tecnología).

Obsérvese que Francia se iguala con Inglaterra, sobre todo a medida que nos introducimos en el siglo XVIII (parte inferior del cuadro). Véase asimismo el descenso relativo de los Países Bajos. También se aprecia el hundimiento de los países ibéricos (España reaccionará un tanto el siglo siguiente), y el claro declinar de Italia, donde la filosofía natural desaparece tras los discípulos de Galileo en favor de las ciencias matemáticas y biomédicas. Tampoco Alemania es lo que era en el Renacimiento, tanto en cantidad como en calidad, predominando, sin embaro, en el terreno químico. Se aprecia también un pequeño pero visible auge de Suiza y Dinamarca.

Hacia 1.700 la población europea se estima en unos 115.300.000 habitantes, de los cuales corresponden 9.300.000 a las islas británicas; 20.000.000 a Francia; 3.400.000 a los Países Bajos 15.000.000 a Alemania, y 13.300.000 a Italia.

CUADRO II

	Inglaterra	*Francia*	*Países Bajos*	*Italia*	*Alemania*	*Suizos, Daneses y otros*
1er cuarto	Wharton. T. (1614-73). An Wilkins. J. (1614-72). O Wallis. J. (1616-1703). M Wharton. G. (1617-81). A Horrocks. J. (1618-41) A Willis. T. (1621-75). MdAn	Lalouvère. A. (1600-64) M Fermat. P. (1601-65). M Roberval. G. P. (1602-75). MF Boulliau. L (1605-94). MA Rohault. J. (1620-72). F Fi Picard. J. (1620-82) FA Mariotte. E. (1620-84). BtFs F Sluse. R. F. (1622-85). M Auzout. A. (1622-91). MFA Pecquet. J. (1622-74). An Pascal. B. (1623-62). MF	Vlacq. A. (1600-67). M Piso. W. (1611-78). Bt Sylvius. F. (1614-72). Md Schooten. F. (1615-60). M	Torricelli. E. (1608-47). MF Borelli. G. A. (1608-79). MFAMd Fs Grimaldi. F. M. (1618-63). FA Ricci. M. (1619-82) M Viviani. V. (1622-1703). M	Kircher. A. (1601-80). Q F HGO Guericke. O. (1602-86). F T Glauber (1604-68). MdQ Haak. T. (1605-90). O Markgraaf. G. (1610-44). A Bt	Glaser. C. (1615-72). Q (suizo) Hevelius. J. (1617-87). A (polaco) Mercator. N. (1619-87). MA (danés)
2.° cuarto	Ray. J. (1627-1705). BtH Boyle. R. (1627-91). F Q Towneley. R. (1629-1707). F Barrow. I. (1630-77). M Lower. R. (1631-91). MdFs Wren. C. (1632-1723). M Hooke. R. (1635-1703). F Willughby. F. (1635-72). H Gregorie. J. (1638-75). MFA Lister. M. (1639-1712) HG Mayow. J. (1640-72) Fs Q Grew. N. (1641-1712). BBt Newton. I. (1642-1727). MFA Flamsteed. J. (1646-19). A Savery. T. (1650-1715). T	Richer. J. (1630-96). FA Dodart. D. (1634-1707). BtFs Vieussens (1635-1715). AnMd Malebranche. N. (1638-15). F. Fi. Magnol. P. (1638-1715). Bt La Hire. P. (1640-1718). MFA Lemery. N. (1645-1715). Q Plumier. C. (1646-1706). BtH Papin. D. (1647-1712). T	Witt. J. (1625-72). M Commelin. J. (1629-92). Bt Huygens. C. (1629-95). MFA Hudde. J. (1628-04). M Leeuwenhoek (1632-23). HT Swammderdam. J. (1637-80). B Ruysch. F. (1638-31). BtMdAn Graaf. R. (1641-73). MdAnFs	Cassini. G. D. (1625-12). A Redi. F. (1626-97). MdH Malphighi. M. (1628-94). Md An G. Montanari (1633-87) AFMBG Bellini. L. (1643-04). Md Fs	Kunkel. J. (1630-03). Q Becher (1635-82). Q Ettmüller. M. (1644-83). Q Leibniz. G. (1646-16). MF Fi Brand. H. (fl 167). Q	Bartholin. E. (1625-98). M F (danés) Glaser. J. (1629-79). AnBt (suizo) Steno. N. (1631-87). AnG (danés) Seki. T. (1640-08). M (japonés) Römer. O. (1644-10). A (danés) Sigüenza y Góngora. C. (1645-1700) (Mexicano) MAH

3er cuarto	Pitcairn, A. (1652-13), MdFs Dampier, W. (1652-15), HBt Halley, E. (1656-42), FA Sherard, W. (1659-28), Bt Gregory, D. (1659-08), MFA Sloane, H. (1660-53), Md H Newtonien, T. (1663-29), T Woodward, J. (1665-28), GBt Gray, S. (1666-36), F Gray, S. (1666-36), F Whiston, W. (1667-52), MFA Hauksbee, F. (1670-13), F Keil, John (1671-21), MF Cheyne, G. (1671-43), MdM Keil, James (1673-19), FsAn Stuart, A. (1673-42), Fs	Sauveur, J. (1653-16), F Tournefort, J. (1656-08), BtMd Fontenelle, B. (1657-57), MAO Maillet, B. (1658-38), G Feuillée, L. (1660-32), Bt A Lagny, T. (1660-34), M L'Hospital, G. (1661-04), M Amontons, G. (1663-05), F Moivre, A. (1667-54), M Vaillant, S. (1669-22), Bt Geoffroy, E. F. (1672-31), QMd	Hartsoeker, N. (1656-25), FT Boerhaave, H. (1668-38), QBtMd	Lancisi, G. M. (1654-20), Md Marsili, L. F. (1658-30), HG Vallisneri, A. (1661-30), BMdH Valsava, A. M. (1666-23), An Sacchieri, G. (1667-33), M E. Manfredi (1674-1739), AF	Tschirnhaus, E. W. (51-08) MF Fi Stahl, G. (1660-34), Q Md Hoffmann, F. (1660-42), Q Md Camerarius, R. J. (1665-21), Bt	Homberg, W. (1652-15) Q (Indonesia/alemania/holandés) Bernoulli, Jal (1654-05), MFA (suizo) Bernoulli, Nil (1687-59), M (suizo) Winslo, J. (1669-00), An (danés) Scheuchzer, J. J. (1672-33), Md H G (suizo)
4.° cuarto	Clarke, S. (1675-29), M Fi Hales, S. (1677-61), Fs Cotes, R. (1682-16), MA Taylor, B. (1685-31), M Simson, R. (1687-68), M Miller, P. (1691-71) Bt Stirling, J. (1692-70), M Bradley, J. (1693-62), A Harrison, J. (1693-76), T Shaw, P. (1694-64), Q Maclaurin, C. (1698-46), M	Cassini, J. (1677-56) A Montmort, P. R. (1678-19) M Bourguet, L. (1678-42) BtQ Desaguliers, J. (1683-44), F Réaumur, R. (1683-57), HB MFT Astruc, J. (1684-66), Md Jussieu, A. (1686-58), HBt Dufay, C. F. (1698-39), F Maupertuis, P. (1698-59), B MF Bouger, P. (1698-58), F Jussieu, B. (1699-77) Bt	Fahrenheit, G. D. (1686-36), F S'Gravesande (1688-42) FtMF Musschenbroek (1692-61), F	Riccati, J. F. (1676-54), M Micheli, P. A. (1679-37), Bt Fagnano, G. C. (1682-66), M Morgagni, G. B. (1682-71), Md An	Heister, L. (1683-58), MdAn Dillenius, J. J. (1687-47), Bt	Hermann, J. (1678-33), M (suizo) Bernoulli, Nil (1687-59), M (suizo) Brandt, G. (1694-68), Q (sueco) Klingenstierna, S. (1698-65) MF (sueco)

de Colbert en Francia la privó de un mercado notable, mientras que la agresividad inglesa resultó desastrosa. Aún en el XV Inglaterra era un país subdesarrollado que exportaba a Amberes y Brujas más lana bruta que paños. Pero el desastre italiano a comienzos del XVI y el deterioro de la libra, depreciada por Enrique VIII, multiplicaron por 170 las exportaciones de paños. Eso entrañó la difusión de la industria textil inglesa y luego el crecimiento naval, convirtiendo a Londres en una ciudad emergente de comerciantes y artesanos interesados por la técnica y las matemáticas prácticas, como T. Gresham, fundador del Royal Exchange y del Gresham College para la formación matemática de las «clases activas». Las emigraciones de valones y hugonotes desplazados por el catolicismo continental añadieron el conocimiento de las técnicas financieras e industriales necesarias para promover y desarrollar las manufacturas.

Si no resultan insuperables, las dificultades agudizan el ingenio. Primero, la carencia inglesa de cobre llevó en el XVI al desarrollo de altos hornos y acerías. La fabricación abundante y barata de cañones benefició la exportación y permitió artillar una flota creciente. Luego, el aumento de población, la mejora del nivel de vida y la creciente industria crearon un déficit grave de madera, hasta el punto de que a comienzos del XVII se hubo de importar cañones suecos. Ello obligó a dominar el uso de recursos carboníferos, cuyo consumo se disparó a partir de 1630, decantando a Inglaterra hacia la tecnología del hierro y el carbón típica de la posterior Revolución Industrial.

La Ley de Navegación (1651) contra la función intermediaria de los armadores holandeses desembocó en la guerra de 1652-54. En 1662, Carlos II impuso la soberanía inglesa sobre los mares adyacentes, introdujo tributos pesqueros y exigió acceso a las Indias Orientales, lo que desencadenó de nuevo las hostilidades de 1665-67. So pretexto de echar una mano contra el inglés, los ejércitos franceses amenazaron por tierra la autonomía de esa pequeña nación. Comenzó entonces la hegemonía inglesa, seguida de lejos por Francia.

Pero ocupémonos ahora del ámbito más estrictamente cultural de la ciencia.

1.3. La cultura clásica: el humanismo

El humanismo tiene tanta importancia filosófica como editorial. La disrupción del orden medieval arrastró consigo una pérdida de atractivo de la filosofía de las escuelas que no mimaba el mundo del hombre, atrapado con una lógica férrea entre Dios y la Creación, al modo en que mundanamente lo estuviera entre el Papado y el Imperio. El espíritu burgués de iniciativa y riesgo individual, de autonomía moral y enfrentamiento solitario a un

mundo desconocido cuyo desenvolvimiento interno daba vértigo y cuyos límites externos se hallaban en expansión, precisaba otro tipo de filosofía.

El movimiento se inició en 1397 con las conferencias que el diplomático bizantino M. Chrysoloras dió en Florencia sobre lengua y literatura griegas. A través de este interés filológico destilaba el pensamiento y valores clásicos, la atención a héroes no cristianos enfrentados a un mundo ajeno, que suministraban un modo autónomo de enfocar la realidad presente.

En principio el humanismo no era especialmente afín a la ciencia matemática y natural, que a pesar de todo no dejaba de estar presente en el pensamiento de Platón y Aristóteles. Aunque se ha hecho mucho hincapié en la importancia del primero durante el Renacimiento, quizá por el carácter revoltoso e iconoclasta de algunos de sus seguidores, las quinientas ediciones de sus obras palidecen ante las tres o cuatro mil de Aristóteles. La orientación neoplatónica resultó espectacular aunque fuese una alternativa más programática que real; por el contrario, la obra de Aristóteles era incomparablemente superior en botánica, zoología, historia natural, lógica, etc., por lo que se podía estructurar en torno a él un curriculum universitario, algo imposible con el platonismo.

Tras la edición de los manuscritos más literarios, les llegó el turno a los más técnicos. Un 10 % de los aproximadamente 30.000 incunables eran de temas científicos, pues muchos matemáticos vivían del humanismo, como Regiomontano o Peuerbach. En el terreno matemático se completó a Euclides y se dio a conocer a Arquímedes, Apolonio y Diofanto. En el biomédico se descubrió a Celso y se difundió a Teofrasto, Galeno, Aristóteles y Dioscórides. La imprenta benefició la parte gráfica que ya no se corrompía de copista a copista, incitando a incoporar dibujos originales del natural. De importancia crucial resultó el renacer de filosofías naturales olvidadas, como las de Herón de Alejandría, Cicerón o Lucrecio, cuyo *De rerum natura* se editó en 1417. El estoicismo, el atomismo y el epicureísmo ayudaron a articular las primeras filosofías naturales europeas de tipo mecánico corpuscular una vez que, agotado el filón clásico, los occidentales se enfrentaron por su cuenta a la nueva realidad técnica de su mundo, del mismo modo que las corrientes herméticas ayudaron a formular las filosofías naturales de la clave química.

1.3.1. El neoplatonismo

El neoplatonismo y naturalismo renacentista es una corriente que se caracteriza más por un talante que por un cuerpo de doctrina preciso. El movimiento se inició en la Academia florentina a mediados del XV. Cosimo de Medicis encargó a M. Ficino que postergara la traducción de los diálogos platónicos (publicados en 1484) para dedicarse al *Corpus hermeticum*, un grupo de escritos atribuidos a un antiquísimo sacerdote egipcio contempo-

Figura 1.3. Colaboración de artistas y científicos en la observación directa de la naturaleza. (Leonhard Fuchs, *De historia stirpium*, Basilea, 1542.)

ráneo de Moisés, que Casaubon (en 1614) dataría correctamente como escritos entre el 100 y el 300 d. C. El *Corpus* está compuesto por elementos gnósticos, pitagóricos, egipcianos, judaicos y cristianos, y se consideraba la primitiva teología sin corromper, fuente de la filosofía griega transmitida a través del platonismo.

Predicaba la unidad de un cosmos animado, cuya alma era Dios, organizado en una jerarquía de entidades intermedias entre espíritu y materia, capaces de regir el mundo. Frente a la filosofía inmanentista y hasta cierto punto materialista de Aristóteles, el cosmos estaba recorrido por fuerzas inmateriales capaces de actuar a distancia por influencias de tipo simbólico más que mecánico, lo que sustentaba la magia como procedimiento de dominio lingüístico y cabalístico de la naturaleza, y la posibilidad de un ascenso ascético del alma humana hacia la naturaleza divina con la que es continua. A la idea del carácter divino de los astros, especialmente el Sol, se unía la idea del paralelismo entre el macrocosmos del universo y el microcosmos del hombre, cuyas semejanzas y analogías señalaban identidades explotables por el mago, una figura orientada a prácticas ascéticas y experimentales para lograr la regeneración y renacimiento a una realidad superior a través de las cifras, los talismanes o la alquimia.

Por estrambótica que pueda parecer hoy, esta filosofía dirigió el trabajo de personas como Kepler y Newton. Por un lado influyó sobre la aplicación de las matemáticas al estudio de la naturaleza. Frente al cualitativismo aristotélico, se suponía que las matemáticas expresaban la esencia del mundo porque el Demiurgo creaba según armonías geométricas. Asimismo, el culto al Sol, símbolo de la divinidad, pudo contribuir a hacer atractivo el heliocentrismo copernicano. Por otro lado, la naturaleza estaba animada de simpatías, afinidades, cualidades ocultas e influjos a distancia intratables mediante las acciones por contacto y las cualidades manifiestas aristotélicas o

mecánicas. Los principios activos de plantas y medicinas, las simpatías y antipatías entre substancias, la acción de la Luna sobre las mareas, las atracciones astrales y la influencia magnética apuntaban a unos campos científicos por explorar que encontraban en el hermetismo neoplatónico una orientación y un marco conceptual afín.

1.3.2. El aristotelismo

Se suele decir que el aristotelismo fue una traba a la nueva ciencia por su oposición al movimiento de la Tierra, idea fomentada por el aristotélico romo que Galileo hacía aparecer en sus diálogos. Pero desempeñó funciones positivas, al transformarse con el humanismo y hacerse más libre y ecléctico, como atestigua la obra de Nifo, Zabarella, Pomponazzi, Fracastoro o Harvey.

Asi, entre 1550 y 1650 los jesuitas fueron la vanguardia de la astronomía y las matemáticas, incorporando, mediante una filosofía instrumentalista, elementos copernicanos, keplerianos y galileanos. El estudio de los *Segundos Analíticos* de Aristóteles produjo un avance en la comprensión de la lógica de la ciencia, completando los aspectos demostrativos con métodos de regreso inductivo y probable de los fenómenos a las causas, permitiendo argumentos hipotéticos que daban mayor libertad a la especulación matemática en la ciencia natural. A la vez, la incorporación del aristotelismo de Averroes con la doctrina de la doble verdad, revelada y racional, unida al escepticismo de Occam acerca de las posibilidades de alcanzar esta última, liberó la especulación científica de trabas ideológicas o religiosas y permitió mayor juego a procedimientos hipotético-deductivos.

Al mismo tiempo, se dio cabida a tendecias críticas derivadas de Estratón de Lampsaco y Teofrasto que permitían abordar la doctrina del vacío y el corpuscularismo. Incluso se introdujo una buena dosis de experimentalismo, tal como aparece en el influyente *Curso filosófico* (1653) de E. Maig nan, donde se tratan de este modo, por ejemplo, cuestiones de óptica y pneumática.

Este aristotelismo siguió dominando en las universidades frente a un platonismo ideológico con escasos contenidos que enseñar. Mas, a pesar de su flexibilidad y eclecticismo, los desarrollos matemáticos y físicos de Galileo, Gassendi o Descartes produjeron más novedades de las que podía asimilar, por lo que a mediados del XVII perdió su capacidad de organizar el curriculum universitario y Newton ya no tuvo necesidad de polemizar con él. Sólo en el campo de la historia natural, en biologia, botánica y zoología, siguió ejerciendo una influencia beneficiosa hasta el siglo XVIII.

Mientras tanto, apareció una nueva perspectiva inspirada en la realidad técnica y artesanal que barrió el aristotelismo como organizador del saber y relegó el neoplatonismo al campo de las explicaciones metafísicas, más allá de la ciencia empírica. Se trataba de la filosofía mecánico-corpuscular.

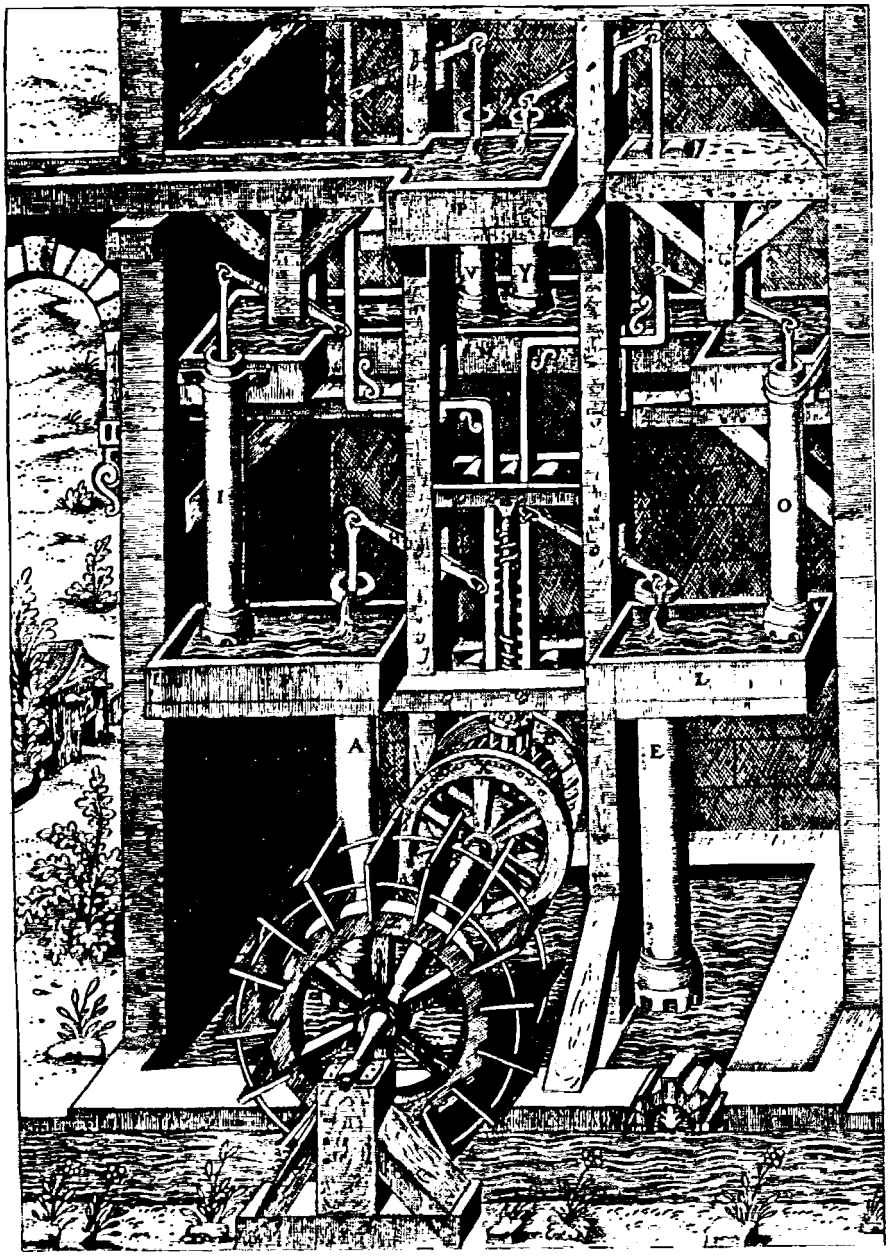


Figura 1.4. Batería de bombas de succión para elevar agua accionada mediante una rueda hidráulica movida por el propio río. (A. Ramelli, *Le diverse et artificiose macchine*. Paris, 1588.)

1.4. El nacimiento de la cultura técnica

Ya hemos señalado la aparición de artesanos lo bastante cultivados como para escribir de su profesión, tanto en el campo de las artes mecánicas como en el de las del fuego. Muchos de los ingenieros mecánicos son conocidos hoy por haber practicado también las bellas artes, como Durero, Leonardo o Alberti; pero a partir del XVI proliferaron también los técnicos del fuego. En 1500 Brunschwig publicó un *Arte de la destilación* y, en 1505, Rülein compuso un *Bergbüchlein* sobre minería. Estos libros fueron superados medio siglo más tarde por la *Pirotecnia* (1540) de Biringuccio y el *De re metallica* (1543) de G. Bauer, alias Agrícola. No es preciso insistir sobre las razones de que en las artes ígneas predominen los alemanes, uno de los cuales, Paracelso, es el inventor de la clave química de la naturaleza.

Los escasos escritos medievales de carácter técnico, como los de Villard Honnecourt, eran meras descripciones de recetas gremiales bien probadas. Ahora empiezan a aparecer máquinas imposibles, sea en Leonardo, Remelli o Zonca. Eso prueba que estaban ensayando novedades, diseñadas sobre bases mecánicas insuficientemente conocidas, lo que fue un estímulo para que los matemáticos como Tartaglia o Galileo desarrollaran teorías científicas novedosas para explicar y comprender el funcionamiento de las máquinas.

Muchas personas cultas procedentes de la universidad comenzaron a tomar en serio los consejos del humanista valenciano Vives o de Rabelais que aconsejaban hacia 1530 aprender en las fábricas y no sólo en los libros. Los procesos artesanales habían acumulado una cantidad enorme de datos brutos acerca de cómo se comporta la naturaleza bajo condiciones en la que espontáneamente no suele mostrarse. Así Galileo comenzaba sus *Discorsi* (1638) planteando problemas suscitados por sus visitas al Arsenal de Venecia, y Descartes iniciaba la *Dióptrica* (1637) aludiendo a la necesidad de explicar y mejorar los inventos prácticos de los ópticos, como el telescopio.

Las primeras sociedades científicas dedicaron su atención a las artes y oficios y la *Enciclopedia* de Diderot contiene el primer estudio sistemático de los mismos. Los procesos artesanales debían ser comprendidos por la ciencia en pie de igualdad con los que se dan de por sí en la naturaleza, con lo que la imagen de ésta quedó teñida del modo de entender los productos de la ténica.

Para el aristotelismo, el arte adulteraba la naturaleza, pero ahora la cotidianeidad de los productos artesanales y su proliferación era tal que formaban parte del paisaje del mundo, siendo fácil concebir que los procesos naturales y técnicos fuesen continuos y obedeciesen las mismas leyes. De este modo, la simplicidad conceptual de las máquinas se convirtió en modelo de toda la naturaleza, y así como la geometría y la mecánica explicaban la operación de bombas, grúas o relojes, podían aspirar a explicar

también el mundo natural. El corpuscularismo apoyó esta tendencia, pues la interacción de partículas en la tradición atomista y epicureísta es una cuestión mecánica de choques y encajes. Descartes concibió el mundo como un conjunto de mecanismos de partículas que, no estando fabricados por nosotros, no precisaban guardar conmensurabilidad con nuestras manos y ojos, pudiendo ser diminutos e invisibles, pero tan mecánicos como un reloj.

La claridad de esta manera ilustrada de ver el mundo se extendió también a las áreas ígneas en apariencia no mecánicas. Como las excesivas promesas del mago hermético chocaron con resultados magros y obscuros, se adoptaron perspectivas mecanicistas, al menos para las operaciones inmediatas de la materia como hizo Boyle, por más que en última instancia la materia inerte y pasiva hubiese de animarse por recurso a principios hylárquicos activos de naturaleza espiritual.

No sólo la técnica indujo una visión filosófica de la naturaleza. Tan importante o más fue su influencia sobre una filosofía social acerca de la ciencia. Bacon alcanzó la madurez a finales del XVI, con el auge del período isabelino, en que W. Raleigh se aventuraba por el Nuevo Mundo y Londres era un hervidero de marinos, comerciantes y manufactureros, optimistas y activos, en ascenso. La afluencia de bienes de consumo prometía cambiar un nivel de vida que para la mayoría era aún de mera subsistencia, y Bacon se convirtió en el profeta de esas nuevas posibilidades. Bacon era más renacentista que moderno, estaba imbuido por las perspectivas de las artes ígneas más que por las geométricas y deseaba promocionar el estudio científico de sus procesos, en los que residía la clave de la estructura de la materia, siendo así mucho más prometedoras para el desarrollo económico que las útiles aunque superficiales artes matemáticas. Así que, dotándose de una vaga filosofía mecánico-corpuscular, se entregó a promover la organización social de la ciencia en bien de la producción, lo que dignificaba hablando en tonos morales y religiosos del «beneficio de la humanidad». Daba voz con el latín del mundo culto a las aspiraciones de la clase activa londinense. Hasta ahora las hormigas, como llamaba a los artesanos en su manera pintoresca de hablar, se habían afanado sin comprender, mientras que las arañas, los filósofos tradicionales, lo extraían todo, como la tela, de sus propias entrañas. Sólo las abejas combinan en un plan colectivo la búsqueda de materiales con la elaboración de la miel de las obras útiles. Olvidémonos pues de las obras vanas de los sabios, más interesados en ser ingeniosos que en hallar la verdad, y pongámonos a trabajar todos codo con codo, aportando con honestidad y modestia pequeñas contribuciones al saber materialmente útil. Este era el mensaje de Bacon.

Frecuentemente daba a entender que el número de tareas a realizar era grande pero manejable (hay una lista al final de *La gran restauración*) y completable en unos cuantos años. El conocimiento completo del mundo estaba

al alcance de la mano, siendo algo asi como cartografiar una nueva tierra: se recogen los datos (historias naturales) y luego la fuerza natural de la mente los organiza en un esquema verdadero. Eso espoleó aún más su insistencia en lo urgente de organizar la exploración colectiva de la naturaleza con ayuda del estado. En la utopía *La Nueva Atlántida*, describió la Casa de Salomón, que era un híbrido de fábrica, instituto de investigación y monasterio. Allí hombres honestos y modosos, divididos en departamentos pero unidos en un plan coordinado, levantaban el mapa de la estructura y leyes de la naturaleza en beneficio de todos.

El espíritu de esta visión influyó sobre la organización, medio siglo más tarde, de las primeras sociedades científicas importantes. Entre tanto, Inglaterra había pasado a comienzos del XVII por una monarquía poco favorable a las nuevas clases e incluso políticamente proespañola. Ello acabó desencadenando la revolución parlamentaria y puritana, seguida de la Commonwealth. Finalmente la restauración monárquica estableció un consenso social y entonces Bacon fue ampliamente editado, leido y utilizado para sustentar los planes de organización de la ciencia en un marco más anglicano que puritano.

1.5. La profesión científica y las instituciones

El aumento del interés por la ciencia desbordó en muchos campos a una universidad que en la Edad Media había cubierto con creces las necesidades profesionales. No es que la universidad fuese reaccionaria (había de todo), sino que su estructura se adaptaba mal a la revolución matemática. En medicina no hubo problemas, realizándose en su seno la revolución anatómica de Vesalio y creciendo debidamente. Se pasó sin problemas de la antigua división entre medicina teórica y práctica a cátedras de cirugía (de origen artesanal), anatomía, botánica y clínica. En Italia se organizaron teatros anatómicos, jardines de simples y visitas prácticas, donde antes las clases habían consistido en leer a Galeno.

Las universidades más dinámicas en el XV y XVI eran, como es normal, las del sur de Alemania y el Norte de Italia. Estas concretamente tenían facultades de Artes que no eran sino una preparación para las Facultades profesionales, especialmente Medicina, pero también Derecho (la Teología se estudiaba en el Norte de Europa). Como las matemáticas se enseñaban en esta facultad preparatoria, tenían un carácter muy elemental, había pocas cátedras (una de matemáticas por doce de medicina) y estaban mal pagadas. La ausencia del copernicanismo no se debe tanto al conservadurismo cuanto a que, con el nivel elemental de las clases, no se llegaba a las sutilidades que justifican la aceptación del increíble movimiento de la Tierra. Con todo acogieron las tendencias a matematizar problemas físicos heredadas de los oxonienses del siglo XIV, aunque de manera más experi-

mental, a través de Blas de Parma o Marliani, tradición a la que pertenece el Galileo de la universidad de Pisa, en la que su antecesor G. Borro hizo el experimento de la torre atribuído a aquél. Asimismo, cuando se descubrió la *Geografía* de Ptolomeo, se dotaron enseguida cátedras de cosmografía.

En resumidas cuentas, cuando se quería estudiar ciencia había que bajar a las universidades de Italia, como hicieron Cusa, Copérnico, Harvey y tantos otros. Sin embargo la capacidad de adaptación era limitada y no fueron capaces de renovar completamente el curriculum matemático. Por ese motivo las matemáticas italianas (y de otros lugares) son un fenómeno extrauniversitario. Casi todos los matemáticos italianos trabajaron bajo patronazgo de príncipes, como entre otros cientos, Commandino, médico y tutor del duque de Urbino, Benedetti, astrólogo del duque O. Farnese, Toscanelli, G. dal Monte y Galileo en la corte de los Gran duques de Toscana, o Cardano con Pío V. Estos dos últimos tenían puestos en la universidad, pero los abandonaron para acogerse a la munificiencia de mecenas privados que daban más prestigio y sueldo.

En la primera mitad del XVII las universidades Inglesas de Oxford y Cambridge ofrecían enseñanzas de matemáticas modestas aunque adecuadas, leyéndose a Gassendi, Kepler, Bacon y Descartes. El último grito no estaba incluido en el curriculum, pero los profesores solían conocerlo. Con todo, tampoco se adaptaron con rapidez. La primera cátedra de geometria se creó en Oxford en 1619, mientras Cambridge sólo tuvo una de matemáticas en 1663, ocupada sucesivamente por Barrow y Newton. Este último, como Galileo, abandonó también la Universidad por un cargo público en Londres.

Toda Europa estaba llena de matemáticos salidos de la universidad trabajando con mecenas, como consultantes de comerciantes y compañías (Harriot, Digges, Wright), en la industria de instrumentos matemáticos (Mercator, Frisius, Behaim), publicando almanaques y textos. Otros se acogieron a las nuevas instituciones de enseñanza, como el Gresham College, el Collège de France o las Escuelas Piattinas de Milán.

Los peor relacionados con la universidad fueron los científicos de especialidades ígneas. Algunos de ellos, como Agrícola, tenían acomodo en industrias mineras y de fundición, pero la mayoría eran médicos, la única profesión afín, dada la medicina química y hermética de Paracelso.

Uno de los efectos del aumento del número de científicos y de la falta de instituciones que los acogiesen se manifestó en la proliferación de cenáculos, asociaciones e instituciones científicas nuevas.

Después de las academias ibéricas del XV y XVI, proliferaron en Francia y sobre todo en Italia cientos de sociedades pequeñas, breves y muchas veces secretas, con los objetivos más variados. Entre las más interesantes científicamente estaba la ya mencionada Academia Florentina, la Academia de los Secretos de la Naturaleza (1560) de G. Porta, clausurada por

practicar la magia, o la famosa Academia de los Linces (1603), la primera academia estrictamente científica, dedicada a la historia natural bajo el patronazgo del duque F. Cesi, contando entre sus miembros a Galileo. Aunque sus realizaciones fueron escasas, sus planes eran excelentes (por ejemplo, no admitir curas), inspirando a J. Jungius en la fundación de su propia Academia ereunetica (1622) en Rostock.

En Francia es conocido el grupo de humanistas de la *Pléiade* o del *Collège Royale* (1552) donde O. Finé daba clases de matemáticas, o la Pequeña Academia de B. Palissy, donde pagando la entrada se podía asistir a sus conferencias sobre fósiles, fuentes, arcillas, etc. No menos conocido es el funcionamiento como institución de la celda de M. Mersenne (fraile, no presidiario), los libros y colecciones de Peiresc o la Academia de Montmor, un rico aficionado a la ciencia, en la primera mitad del XVII.

Sin embargo, la primera academia científico-productiva según esquemas baconianos fue la *Accademia del Cimento* o del experimento (1657-67) organizada por Federico II de Medici y su hermano junto con discípulos de Galileo. Se dedicaron sistemáticamente a la física experimental, sobre todo en pneumática y criología, sin incurrir en discusiones teóricas. Disponían de instalaciones en el Palacio Pitti, con laboratorio, taller y recursos instrumentales generosos.

Pero las primeras grandes academias nacionales, que aún perduran, fueron la Sociedad Real de Londres (1660) y la Academia Real de Ciencias de París (1666). La primera era privada, una especie de club de aficionados con pocos recursos económicos, que logró reunir a los más destacados científicos de Londres y otras partes de la isla, nombrando miembros a los continentales más destacados. Poseía una buena red de contactos gracias a la correspondencia de su primer Secretario, R. Oldenburg, quien también editaba la revista científica *Transacciones filosóficas*. Tenía también puestos de procuradores de experimentos (el primero lo ocupó Hooke) y acogía a personas de la talla de Newton o Boyle. Al estar mal dotada de instrumentos, salarios y fondos no desarrolló planes colectivos. Por el contrario la francesa era un organismo del estado capaz de organizar costosas expediciones a lejanas partes del mundo para medir un grado o la longitud del péndulo que bate segundos con el equipamiento instrumental que hiciera falta. Tenía diversas jerarquías de académicos pagados, distribuidos en secciones que cubrían todo el campo del saber. El rey tenía a la Academia como un gabinete de consulta ministerial y se recababa su juicio acerca de patentes y planes industriales. Aunque cada miembro investigaba por su lado, la institución orientaba el trabajo proponiendo premios para memorias sobre temas de especial interés. Gran parte de la potencia de la ciencia francesa del XVIII deriva de esta academia estatal, algo sin paralelo en Inglaterra, donde la Sociedad Real fue buena mientras sus científicos fueron individualmente productivos al margen de ella.

2. El problema del movimiento

Tras el rápido panorama, esbozado en el Capítulo anterior, del clima socioeconómico e intelectual que presidió la Revolución Científica, se abordan ya en este Capítulo y en los siguientes las principales problemáticas de orden conceptual. Comenzaremos, en concreto, con una de las cuestiones más importantes. Se trata del movimiento, entendido, como se verá, de manera muy distinta a la actual: en tal distinción se encuentra precisamente una de las hechuras de esta transformación conceptual que rotulamos con el nombre de revolución. La historia de esta cuestión (como, por otra parte, la de casi cualquier otra imaginable) debe remontarse a los griegos.

2.1. El movimiento en Aristóteles

Desde la más remota Antigüedad, la humanidad ha intentado hallar una explicación a la gran colección de datos sobre la naturaleza reunida a través de la experiencia directa y de la observación cotidiana. Muchos de estos hechos fueron interpretados mitológicamente por las civilizaciones primitivas. En la Antigua Grecia, los filósofos trataron de explicar todo este conjunto de una forma global y racional. Surgieron distintos sistemas; entre ellos, el más influyente sería el de Aristóteles.

Aristóteles fue un físico, un filósofo de la naturaleza. El sistema que elaboró fue completo y coherente, y en él se alcanzó el objetivo de hallar una teoría que explicara de forma más o menos cumplida los hechos conocidos y el por qué tales hechos eran necesariamente así y no de otra manera.

Dentro de su sistema, la esencia de la naturaleza es el *cambio* que obser-

vamos constantemente en todo lo que nos rodea; de modo que la comprensión de la naturaleza vendrá a través de la comprensión de este cambio. Cambio que no está sometido al azar, sino que responde a un fin, a una suerte de planificación universal. El cosmos aristotélico busca el orden a través del cambio.

Aristóteles atacó el problema de una forma esencialmente cualitativa. A veces se dice que su física fue defectuosa al ignorar el papel de las matemáticas y del experimento, y que por consiguiente constituyó un obstáculo para el desarrollo de la ciencia moderna. Esto no es exactamente así. Aristóteles ni ignoró ni despreció el papel que podían desempeñar las matemáticas entonces conocidas. Las consideraba, en cambio, de utilidad en la descripción geométrica de fenómenos tales como los astronómicos o los ópticos. Pero creía que la esencia de la naturaleza no era de orden matemático. Las formulaciones matemáticas de la Antigüedad, de carácter estático y desvinculadas de las cosas materiales, se avenían mal con la descripción de una naturaleza dinámica, en constante cambio. En cuanto a la observación y al experimento, hay que decir que Aristóteles alentó la primera y no dejó de efectuar alguno de los segundos; no estará de más adelantar que fue precisamente un aristotélico, Girolamo Borro, quien efectuó el famoso experimento de la torre cuya prioridad se atribuye sin fundamento a Galileo. Lo que está ausente es la idea de experimentación *sistemática*. En el siglo XVII surgirá una filosofía experimental en la que se tratará de recoger artificialmente una amplia variedad de nuevos hechos poniendo a la naturaleza en situaciones anómalas o, como decía Francis Bacon, «retorciéndole la cola al león» para ver qué pasaba. Pero Aristóteles, en lo tocante a la física, tenía ya suficientes hechos naturales que explicar. Por otra parte, al igual que sus contemporáneos, tampoco estaba interesado en extraer de la naturaleza todas sus posibles utilidades. Su teoría era capaz de dar respuesta a las cuestiones que entonces, dentro de aquel modelo de sociedad, se consideraban relevantes, y por ello fue ampliamente aceptada.

Aristóteles defendió la existencia de un material universal o «materia prima», susceptible de adoptar las distintas formas con que conocemos la materia. Estas formas preexisten todas ellas, como posibilidades o «potencias», en la materia prima, pero sólo se actualizan gracias a la intervención de cuatro cualidades fundamentales: lo frío, lo cálido, lo seco y lo húmedo.

Agrupando por parejas estas cualidades, y eliminando los contrarios frío-cálido y seco-húmedo, resultan cuatro pares: frío-seco, frío-húmedo, cálido-seco y cálido-húmedo. Cada una de estas parejas de cualidades, al actuar sobre la materia prima, da lugar a los cuatro elementos fundamentales: tierra, agua, aire y fuego. La tierra es fría y seca, el agua fría y húmeda, el aire es cálido y húmedo, y el fuego es cálido y seco. Estos cuatro elementos no se encuentran en la naturaleza en su estado puro, sino que se combinan para formar los cuerpos que nos rodean. De hecho, la tierra, el agua, el aire

y el fuego que conocemos no poseen estas cualidades en su grado y equilibrio más perfecto.

Un aspecto importante de la teoría de Aristóteles es que los cuatro elementos pueden transformarse unos en otros por sucesivos cambios de una cualidad en su contraria; así, el agua puede convertirse en fuego al convertirse el frío-húmedo en cálido-húmedo y éste a su vez en cálido-seco. De modo que, por convenientes cambios de cualidad, un cuerpo puede sufrir distintas transformaciones.

Como es sabido, el universo aristotélico tiene simetría esférica. En el centro está situada la Tierra, y por encima de ella se extiende una serie de

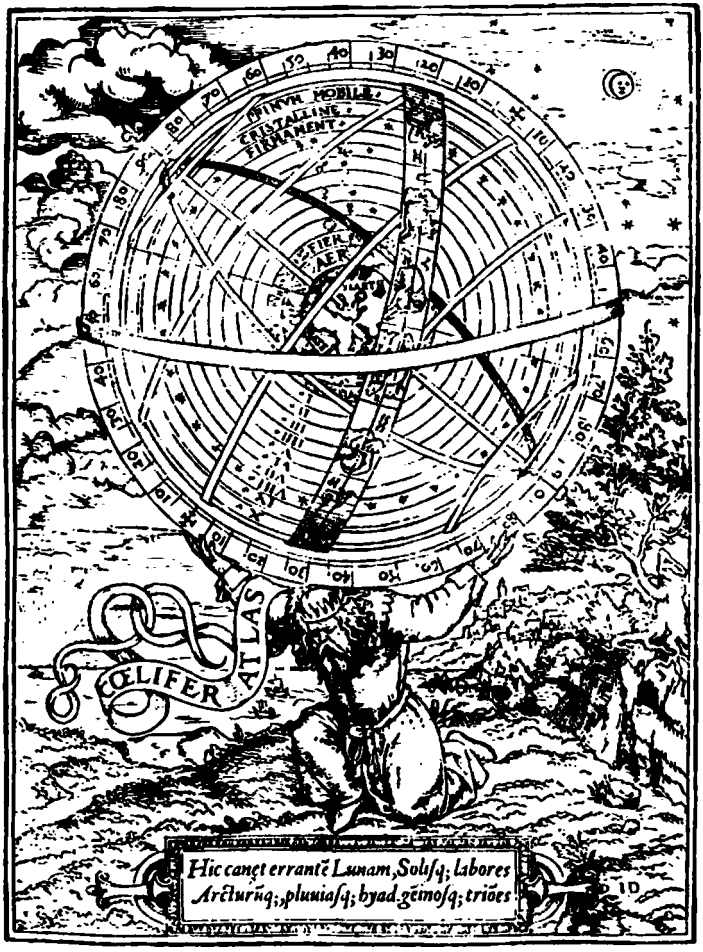


Figura 2.1. Atlas sosteniendo al universo. De William Cunningham. *The Cosmographical Glasse* (1558).

esferas concéntricas, a cuyos movimientos están ligados el Sol, la Luna, las estrellas y los planetas conocidos. La esfera de la Luna marca la separación entre dos regiones sometidas a leyes diferentes. Por encima, en los orbes celestes, reina la inmutabilidad. Por debajo, en la región terrestre, el cambio. En concordancia con esto, Aristóteles incluye un quinto elemento, el éter, del que está exclusivamente constituída la región supralunar. Este quinto elemento es inmutable, pues no está formado, como los terrestres, por cualidades contrarias.

La región terrestre, pues, está sometida a cambio, a transformación, a *movimiento*. Y aquí es importante entender el término «movimiento» en este sentido de cambio o transformación. En el sistema aristotélico, existen cuatro clases de movimiento: de substancia (cuando una substancia da lugar a otra), de cualidad (cuando un atributo se transforma en otro), de cantidad, y de lugar. A este último tipo de cambio se le denominaba *movimiento local*. De modo que, dentro de la concepción aristotélica, tan movimiento es el crecimiento de un manzano (cambio de cantidad), como su desplazamiento al trasplantarlo (de lugar), el cambio de color de sus frutos al madurar (de cualidad), o la transformación de su tronco en cenizas al quemarse (de substancia).

Cada uno de los cuatro elementos que constituyen la región sublunar posee en ella un «lugar natural» que, en busca del orden, tiende siempre a ocupar. En el centro se hallaría el lugar de la tierra; a continuación, en sucesivos estratos, los del agua, el aire y el fuego. Cuando se desplaza a un elemento de su lugar natural retorna a él (siempre que no haya obstáculos que se lo impidan) mediante un tipo de movimiento local llamado *natural*. De lo dicho es claro que este tipo de movimiento sólo se efectúa en línea recta hacia arriba o hacia abajo. (Las esferas celestes constituyen un caso aparte, pues estando formadas por un elemento inmutable, no cabe el desorden; el movimiento circular, reiterado indefinidamente, mantiene el orden).

Junto al movimiento natural existe otro tipo de movimiento denominado *violento*. Es aquel movimiento que fuerza a un cuerpo a abandonar su lugar natural, o lo desplaza en cualquier dirección que no sea la vertical y en un sentido que no sea el que conduzca a su lugar natural.

Para Aristóteles, todo cambio o movimiento debe obedecer siempre a una causa, y cesa cuando ésta deja de actuar. Además, el efecto debe ser siempre proporcional a la causa que lo produce. En el movimiento local, sea natural o violento, la causa o motor debe ser externa al móvil, y debe permanecer en contacto con él durante el transcurso del movimiento.

Aristóteles ve en el «peso» la causa del movimiento natural. Considera como opuestos absolutos los dos sentidos (hacia arriba y hacia abajo) del movimiento natural y, en consonancia, presenta al «peso» y a la «ligereza» como absolutos y opuestos según estos sentidos. Estos conceptos se definen en relación con la tendencia de los elementos a ocupar su lugar natural. La

tierra es absolutamente pesada, y siempre tiende a ir hacia abajo; el fuego es absolutamente ligero, y tiende siempre a subir. El agua y el aire, en cambio, tienen un peso relativo: son pesados en el lugar del fuego, y ligeros en el de la tierra. Los cuerpos conocidos, que están formados por proporciones variables de estos cuatro elementos, serán diversamente ligeros o pesados de acuerdo con su composición.

2.2. La teoría del Impetus

Dentro de la física de Aristóteles, los temas relativos al movimiento local no ocuparon un lugar especialmente preponderante; y menos todavía en lo tocante al movimiento violento, resultando insuficientes sus explicaciones. De ahí que el desarrollo y crítica de las mismas constituyesen uno de los tópicos de sus comentaristas. En concreto, Aristóteles dejó abiertas dos importantes cuestiones. El motor debía ser siempre exterior al móvil, pero esto no era evidente en el caso del movimiento natural. Por otra parte, el motor siempre debía estar en contacto constante con el móvil a lo largo de todo su desplazamiento, lo que tampoco resultaba claro en el caso del movimiento violento de los proyectiles. En este último tipo de movimiento (por ejemplo, el de una flecha) la causa que lo produce (el impulso que le imprime la cuerda del arco) no actúa más que en el momento inicial.

El mismo Aristóteles había dado una respuesta a este problema haciendo intervenir al medio en cuyo seno se efectuaba el movimiento. Opinaba que el motor (la cuerda tensa del arco) transmitía al aire inmediato la cualidad o capacidad de mover al proyectil. Tal cualidad se comunicaba sucesivamente, atenuándose, a las distintas porciones de aire que aquél atravesaba.

Esta explicación no resultó demasiado satisfactoria. Aceptada en un primer momento, fue más tarde sometida a crítica. Tal como afirmaría el alejandrino Juan Filopón (también conocido como Juan el Gramático) en el siglo VI d.C., de acuerdo con la explicación de Aristóteles debería ser posible eliminar del proceso al impulsor; pues si la causa del movimiento está en el aire, debería lograrse el mismo efecto agitando violentamente al aire situado tras el proyectil. Así, Filopón defendió la idea de que la causa del movimiento debía residir en el proyectil mismo. El impulsor transmitiría o imprimiría en el móvil un poder cinético, una fuerza motriz incorpórea que actuaría como causa del movimiento. De este mismo parecer serían también algunos autores árabes, entre ellos Avicena.

Bien se conociese a través de traducciones del árabe, bien fuese desarrollada independientemente, esta idea fue debatida por algunos autores en el occidente cristiano, donde la fuerza incorpórea de Filopón recibiría el nombre de «impetus». Fue, sin embargo, rechazada hasta que en el siglo XIV la defendió y elaboró el comentarista parisino Juan Buridán.

Buridán definió el impulso o impetus como una cualidad cuya naturaleza era la de mover el cuerpo en el que ha sido impresa. Este impetus era tanto mayor cuanto mayor fuese el movimiento comunicado al móvil; a diferencia de autores anteriores, para los que este impulso se atenuaba por sí mismo, para Buridán se atenúa sólo en proporción a la resistencia del medio y a la oposición de la tendencia del cuerpo a moverse hacia su lugar natural. Además, la cantidad de impetus que éste podía recibir del impulsor estaba en proporción directa con su cantidad de materia. Es decir, que si dos cuerpos del mismo tamaño y forma, uno de madera y el otro de hierro, fuesen arrojados con el mismo movimiento, éste perduraría más en el trozo de hierro, al tener mayor cantidad de materia y poder recibir así mayor impetus.

2.3. La caída de los graves

Otro aspecto del sistema de Aristóteles relativo al movimiento que fue objeto de debate en la Edad Media fue su explicación de la caída de los graves. Como se ha visto, Aristóteles había explicado ésta como una tendencia de estos cuerpos a ocupar su lugar natural; el efecto era directamente proporcional a esta causa, e inversamente proporcional a la resistencia del medio en el que se producía el movimiento. Tal como explica el mismo Aristóteles, si una causa o poder mueve a un cuerpo una distancia D en un tiempo T, en el mismo tiempo este mismo poder movería a un cuerpo la mitad que el anterior a una distancia 2D, o bien lo movería a la distancia D en la mitad del tiempo T. Es decir, que la rapidez del movimiento de caída está en proporción directa con el peso.

Apliquemos ahora esta ley al caso de dos graves que se dejan caer desde la misma altura. Suponemos que en ambos casos la resistencia del medio es la misma, pero que un cuerpo pesa el doble que el otro. Si el cuerpo más pesado recorre la altura D en un tiempo T, el más ligero, cuyo poder motriz es la mitad, la recorrerá en el doble de tiempo. Sin embargo, si se hace la prueba, relativamente fácil de ejecutar, se ve que ambos cuerpos llegan al suelo casi al mismo tiempo, por más que se diferencien en peso. Circunstancia que ya haría notar Juan Filopón, pero a la que sólo se comenzaría a prestar atención en la segunda mitad del siglo XVI, cuando las matemáticas comenzasen a jugar un papel decisivo en la descripción del cambio.

Otra dificultad de la proporción establecida por Aristóteles era su ámbito limitado de aplicación, algo que no resultó satisfactorio para todos sus comentaristas medievales. Según esta proporción, la velocidad se reduce a la mitad cuando la fuerza impulsora se reduce a la mitad. Así, si la fuerza es igual a la resistencia, la velocidad no se anula, y aun en el caso de una fuerza menor que la resistencia todavía se seguiría produciendo un cierto movimiento, en abierta contradicción con la experiencia cotidiana. Por

ejemplo, se necesitan muchos hombres para mover un gran bloque de piedra; pero, según esta ley, un solo hombre que se apoyase en él todavía podría moverlo un tanto. Consciente de esto, Aristóteles había limitado su ley al caso de que la fuerza fuese mayor que la resistencia.

A principios del siglo XIV Tomás Bradwardine, del Merton College de la universidad de Oxford, propuso una interpretación que obviaba la dificultad. Su interpretación era sencilla: el movimiento seguía siendo proporcional al poder motriz y a la resistencia, pero esta proporción debía ser geométrica en lugar de aritmética. Es decir, que si una relación F/R dada producía un movimiento V, entonces un movimiento 2V se daría, no con 2F/R, sino con $(F/R)^2$. En la terminología matemática de la época, a lo que hoy en día se le llama «elevar al cuadrado una fracción» se le denominaba «doblar la fracción» o, para ser más precisos, «doblar la proporción» (pues las proporciones de la época eran distintas de las fracciones actuales, y no se operaba con ellas con los procedimientos algebraicos que hoy empleamos). De modo que la ley de Bradwardine decía sencillamente que para doblar el movimiento había que doblar la proporción entre poder motriz y resistencia; y a la inversa, para reducirlo a la mitad había que subdoblarla, lo que en términos actuales equivale a extraer su raíz cuadrada. En suma, con esta nueva ley lo que se hace es considerar la proporción entre fuerza motriz y resistencia como una suerte de «fuerza neta» (en lugar de considerar la fuerza y la resistencia separadamente, como hizo Aristóteles) y establecer la anulación del movimiento cuando esta «fuerza neta» se anula al equilibrarse la fuerza motriz con la resistencia.

La formulación de esta nueva ley, aún cuando se hiciera dentro del sistema aristotélico, apuntaba ya dos importantes novedades: desplazaba la atención del «por qué» al «cómo» del movimiento local, y subrayaba el papel de las matemáticas en la indagación del mismo. Por otra parte esta ley, que tampoco refleja la realidad del fenómeno de la caída de los graves, no fue sometida al experimento. Y ello tanto por razones similares a las expuestas más arriba para el caso de Aristóteles, como por otras particulares de la situación de la ciencia medieval.

El sistema de Aristóteles que se recibió en el occidente cristiano constituía una concepción pagana del cosmos. Como tal, algunos de sus puntos pronto entraron en conflicto con el dogma. Así sucedía por ejemplo con la afirmación de la eternidad del mundo, contraria al relato del Génesis, o con el caso del sacramento de la eucaristía. En dicho sacramento una substancia dotada de los accidentes característicos del pan y del vino se convertía en otra (la carne y la sangre de Cristo), subsistiendo, sin embargo, los accidentes anteriores, aunque sin acompañar a materia alguna. En la física de Aristóteles era inconcebible la existencia de un accidente sin substancia a la que atribuírlo.

Si el sistema aristotélico salió más o menos indemne de esta prueba fue

gracias a nuevas concepciones sobre el alcance de la ciencia. Guillermo de Occam, al defender la absoluta omnipotencia de Dios, debilitó la vinculación entre causa y efecto, tan importante para Aristóteles. Sostenía que las pruebas filosóficas nada podían aportar a la teología. Dios podía hacer cualquier cosa, incluso que un accidente existiera sin substancia. Esto le llevó a un empirismo radical: sólo podía establecerse una relación de causa a efecto cuando tal vinculación fuera manifiestamente patente a los sentidos. Así, todo enunciado o explicación de carácter general sobre la naturaleza debía ser necesariamente hipotético. Un mismo fenómeno podía ser explicado desde diferentes supuestos, sin que se pudiese tener la certeza de cuál era el verdadero, algo que se conocía como «salvar las apariencias». Para Occam, debía preferirse siempre la explicación más simple.

De todos modos, era posible defender que la indagación científica permitía alcanzar un grado de verdad aceptable para la razón humana. Pero el escepticismo sobre la posibilidad de conocer la verdadera realidad física alentó en el siglo XIV los estudios de carácter hipotético desarrollados a la luz de la razón, mediante la aplicación de herramientas lógico-matemáticas. Algo que permitió, aun dentro de la general aceptación del sistema aristotélico, la exploración de alternativas al margen de la ortodoxia.

2.4. El problema de la latitud de las formas

Por «latitud de una forma» o de una cualidad se entendía que ésta podía tener distintos grados de intensidad. Esta era una idea que se desarrolló en la antigüedad dentro de las tradiciones de la medicina y la farmacia. La doctrina galénica de los cuatro humores, según la cual la salud consistía en el equilibrio entre ellos, llevó a plantearse el grado en que se daba la enfermedad, la medida en que alguno de los humores se hallaba desequilibrado, y por consiguiente la dosis de medicamento necesaria para restablecer el equilibrio.

Esta doctrina se aplicó en la Edad Media a todas las cualidades en general, especialmente a aquéllas que variaban entre pares de contrarios, como el calor y el frío, sequedad y humedad, blancura y negrura, luz y oscuridad, etc. La intensidad de la cualidad, o su «latitud», variaba continuamente entre dos puntos extremos, pasando por un grado intermedio o neutral. La progresiva intensificación de una cualidad se consideraba de carácter aditivo. Por ejemplo, en el caso de la luz, ésta se hacía más intensa añadiendo nueva iluminación a la ya existente. Esto se podía expresar geométricamente. Toda cualidad variaba respecto de algo invariable (en el caso del movimiento, el espacio o el tiempo), cuya «extensión» o «longitud» se podía representar mediante una recta horizontal, como muestra la figura 2.2. A partir de la misma, verticalmente, se representaba la latitud por un segmento de dimensiones correspondientes al valor de la cualidad para esa longitud dada.

Se trata de una representación similar a la que hoy día se emplea para trazar el grafo de una función de un variable; no hay que olvidar, sin embargo, que la definición del concepto de función es muy posterior a la época considerada.

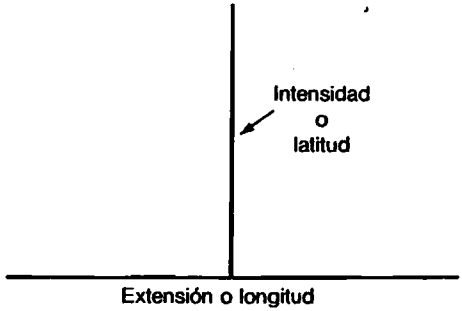


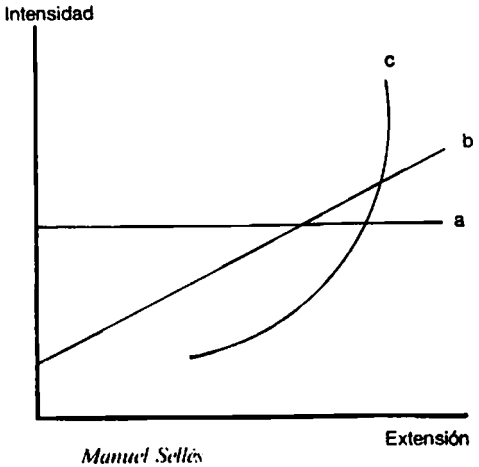
Figura 2.2.

La teoría de la latitud de las formas también se aplicó al caso concreto del movimiento local. Aristóteles no había pasado de definir la rapidez de este movimiento. De hecho, el concepto de velocidad, tal como hoy se entiende, no existía en la física aristotélica, y por ello se ha evitado el empleo de tal término hasta este punto de la exposición. La velocidad es la proporción entre un espacio y un tiempo, es decir, entre dos magnitudes distintas. En la época, tales proporciones se hallaban desprovistas de sentido; sólo podía establecerse una proporción entre magnitudes comparables. Se puede decir, desde luego, que está presente la idea de velocidad media, cuando se afirma que un móvil recorrerá una determinada distancia en un intervalo de tiempo dado. Pero desde luego no estaba definida la velocidad instantánea, la velocidad en cada punto del recorrido. En consecuencia, y aunque era bien conocido que la rapidez de la caída de un grave iba aumentando progresivamente, también el concepto de aceleración, como variación de esa velocidad instantánea, estaba ausente.

Una cualidad podía hallarse *uniformemente* distribuída, o bien de una manera no uniforme o *disforme*. Dentro de este último caso se distinguía el de una distribución *uniformemente disforme*, en la que la latitud de la cualidad variaba en una proporción constante, o bien el de una *disformemente disforme*. El primero de estos últimos casos era el del calor o de la luz, cuya intensidad disminuía progresiva y uniformemente al aumentar la distancia a la fuente.

En el caso del movimiento local, representado en la figura 2.3., la intensidad de la cualidad en un momento dado se correspondería con lo que hoy llamamos la velocidad instantánea. De una forma hipotética, dentro de un tratado sobre reglas de índole lógico-matemática, William Heytersbury, de la universidad de Oxford, estudió los casos de movimientos uniformes y disformes, y en este último los movimientos disformes respecto al tiempo. Indicó que la velocidad instantánea venía dada por la medida del espacio que el móvil hubiese recorrido, de proseguir a esta misma velocidad, durante un tiempo dado. Y definió la aceleración, análogamente a la velocidad, como dada por la medida de las latitudes del movimiento.

Estudiando el caso de los movimientos uniformemente disformes, Hey-



Manuel Sellés

Configuraciones de Movimientos:

a) Uniforme
b) Uniformemente disforme
c) Disformemente disforme

Figura 2.3.

tesbury enunció una regla descubierta hacía poco en Oxford, conocida hoy por los historiadores como el «teorema de la velocidad media». En términos de movimiento local (pues la regla se aplicaba a la variación uniformemente disforme de la latitud de cualquier cualidad, como por ejemplo la sabiduría) se puede enunciar diciendo que, respecto al espacio total recorrido, un movimiento uniformemente disforme es equivalente a un movi-

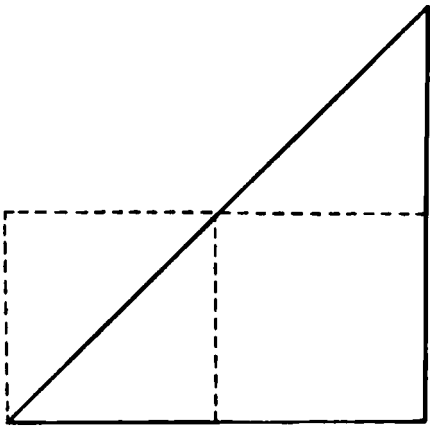


Figura 2.4.

miento uniforme cuya velocidad fuese la del movimiento anterior en el instante medio del tiempo. Es decir, que si un móvil recorre con aceleración constante una distancia D en un tiempo T, y si en el instante T/2 tiene una velocidad V, entonces un movimiento uniforme cuya velocidad sea precisamente V llevará al móvil a recorrer el mismo espacio D en el mismo tiempo T.

Su demostración geométrica es sencilla. En la figura 2.4. se ve que, si la longitud representa un determinado intervalo de tiempo, y la latitud la velocidad del móvil que la recorre partiendo del reposo, un movimiento uniformemente disforme vendrá representado por la línea inclinada. El área definida por ésta (el área del triángulo) representará entonces la distancia atravesada. Esta área es evidentemente igual a la del rectángulo dibujado con línea de trazos, que representa un movimiento uniforme a la velocidad media del anterior.

2.5. La teoría del impetus y la caída de los graves

Los conceptos desarrollados en relación con el estudio de la latitud de las formas, aunque se aplicaron a distintos casos de movimiento local, no llegaron a aplicarse en un primer momento al problema de la caída de los graves, quizás porque, en ausencia de mediciones concretas, no resultaba evidente que se tratase de un movimiento uniformemente disforme. En París, sin embargo, Buridán y su discípulo Alberto de Sajonia se ocuparon del problema.

Como se ha visto, la teoría del impetus, aplicada al caso de los proyectiles, proponía una causa de su movimiento una vez que habían abandonado el contacto con el impulsor; se trataba de una causa interna, aunque impresa. Esto servía para todos los movimientos violentos. El caso de los movimientos naturales, como el de la caída de graves (o el ascenso de leves), era de muy distinta índole, pues en ellos la causa interna existía en virtud de su propia constitución.

En la caída de los graves, sin embargo, se producía un progresivo aumento de velocidad. Es decir, que una causa constante producía un efecto progresivamente mayor. Aristóteles había tratado de explicar esta circunstancia suponiendo un aumento en dicha causa, en el poder motriz, a medida que el cuerpo se acercaba al objetivo final de alcanzar su lugar natural. Juan Buridán, por su parte, defendió la existencia de una suerte de «impetus accidental» o «gravedad accidental» que el cuerpo adquiriría en virtud de su propio movimiento y en cantidad proporcional al mismo. Así, el impetus adquirido, cada vez más intenso, daría cuenta de la cada vez mayor rapidez del movimiento.

Basándose en esta idea, Alberto de Sajonia tratará de hallar la ley que rige el movimiento de caída libre desde el reposo. Su conclusión final, tras

estudiar distintas posibilidades, es que, de acuerdo con Buridán, en el momento inicial sólo actúa la gravedad intrínseca del cuerpo. Tras atravesar un determinado espacio, digamos de valor 1, en un tiempo 1, ha adquirido una cierta velocidad, y en consecuencia un cierto impetus. Entonces comienza a actuar dicho impetus, y en el nuevo intervalo de tiempo unidad, se recorre el doble de espacio y se adquiere el doble de velocidad. Este segundo tramo produce a su vez un impetus que viene a añadirse al anterior y que actúa en el tercer tramo del movimiento, donde, en una nueva unidad de tiempo, se recorre una distancia doble de la recorrida en los tramos anteriores, es decir, de 4, y se adquiere una velocidad de 4, y asi sucesivamente. De modo que en los intervalos de tiempo 1, 2, 3,... el espacio acumulado es de 1, 3, 6, 10,...

Más que esta ley de movimiento, que no coincide con la actual y no se basó en experimento alguno, hay que destacar el carácter discontinuo de los distintos tramos del movimiento; éste resulta asi compuesto por una sucesión de tramos uniformes, por lo que no constituye un movimiento uniformemente disforme. Esto podría explicar el hecho de que los autores que se ocuparon de distintos movimientos locales en el contexto del estudio de la latitud de las formas no recurriesen, en general, al caso de la caída de graves. Más tarde, hacia 1550, el español Domingo de Soto afirmó que tanto el movimiento violento de un proyectil como el natural de la caída de un grave eran uniformemente disformes respecto del tiempo, y aplicó a ambos el teorema de la velocidad media. La distinción tradicional entre los movimientos naturales y violentos se reducía por vez primera, y desde dentro de la tradición escolástica, a través de las matemáticas.

2.6. Los mecánicos italianos

En relación con el movimiento local, el siglo XIV aportó al sistema aristotélico dos importantes desarrollos: el estudio del impetus como causa del movimiento, y la exploración, desde una alianza entre la lógica y las matemáticas, de la relación funcional entre la causa (fuerza motriz) y el movimiento local resultante. Los siguientes avances en el tema tendrán lugar en la Italia del siglo XVI, que heredará este desarrollo medieval. Pero junto a él contarán decisivamente otras influencias.

Con ser dominante, la tradición aristotélica no fue la única que la Edad Media heredó de la Antigüedad clásica. Junto a la influencia de la obra de Aristóteles también hay que alinear la de Arquímedes. Ambas diferían bastante. Si en Aristóteles se abordan los problemas de la mecánica desde un punto de vista dinámico, en Arquímedes la aproximación es esencialmente de carácter estático: el tiempo no interviene. Otra diferencia radical es que, mientras en la física aristotélica predominan las explicaciones de índole

cualitativa, en los trabajos arquimedianos se busca directamente someter los fenómenos al razonamiento geométrico.

En la Edad Media la obra de Arquímedes sólo fue conocida de manera bastante indirecta. Su influencia, no obstante, dio lugar a la aparición de una «ciencia de los pesos» que trataba de problemas relacionados con la balanza o el plano inclinado desde la formulación de postulados y teoremas y su subsiguiente demostración geométrica. Era un campo que, dentro de la clasificación de las ciencias imperantes, pertenecía al dominio, no de la física, sino de las matemáticas, al igual que otras disciplinas como la astronomía o la óptica. Esta «ciencia de los pesos» conoció algunos desarrollos y, bajo la influencia de la tradición aristotélica, abordó los problemas de la estática mediante una aproximación de índole dinámica.

Con el advenimiento del humanismo y de la imprenta se puso a disposición de los sabios un nuevo caudal de obras clásicas. La obra matemática de Euclides, si bien ya conocida, se completó y difundió enormemente. Y, junto a ella, también los tratados de Arquímedes y otros pertenecientes a la tradición mecánica de carácter tecnológico (relativos a la construcción y empleo de máquinas).

En consonancia con los intereses de la época, ya mencionados en el Capítulo anterior, todas estas obras y tradiciones comenzaron, si bien todavía de una forma vacilante e inconexa, a aglutinarse en lo que vendría a constituír una nueva ciencia: la mecánica. Entre tanto, y al margen de las universidades, el método arquimediano irrumpiría en los estudios sobre el movimiento.

Un trabajo de especial relevancia en este sentido fue la *Nova scientia* de Niccolò Tartaglia, publicada en 1537; una obra que —y esto no deja de ser muy significativo— estaba dedicada a la artillería o, por mejor decir, a la balística. Aquí, por primera vez, las especulaciones aristotélicas sobre el movimiento local se unen al método matemático arquimediano, subordinándose todo ello a la resolución de un tema tan práctico como acuciante.

Tartaglia era un autodidacta, y esto explica que la obra no se apoye en los más importantes desarrollos medievales. La trayectoria de los proyectiles había sido discutida, a la luz de la teoría del impetus, por Alberto de Sajonia. Según Aristóteles, un cuerpo no podía tener a la vez dos movimientos contrarios; por consiguiente, no podía estar sometido a la vez a un movimiento natural y a otro violento, ya que el uno buscaba el orden y el otro producía precisamente lo contrario. Uno de ellos siempre predominaría sobre el otro, y sería éste al que obedecería el cuerpo. Alberto de Sajonia pensaba que, al ser lanzado un proyectil, había una primera etapa en la que el impetus predominaba sobre la gravedad natural del cuerpo; la trayectoria era así rectilínea, obedeciendo al impetus predominante. En una segunda etapa, debilitado este impetus, defendía la existencia, a la vez, de la acción

conjunta de éste y de la gravedad, dando lugar a un tramo curvado hacia abajo; en este tramo se producía un momento de equilibrio, de reposo (si el proyectil era lanzado hacia arriba). Finalmente, en una tercera fase predominaría la gravedad, y el cuerpo caería verticalmente.

En esta primera obra, Tartaglia adopta el mismo modelo de trayectoria, sin tener en cuenta ese momento de reposo en el tramo mixto. Sin embargo, parece que debió ser bien consciente de que dicho modelo no reflejaba la realidad; en el frontispicio de su obra aparecen dibujadas dos trayectorias de forma muy aproximadamente parabólica. Por otra parte, considerará a la resistencia del aire, de acuerdo con la práctica, como algo a minimizar adoptando para el proyectil una figura conveniente. Algunos años más tarde, en sus *Quaesiti et inventioni diverse* (1546), volverá a retomar el problema, defendiendo ya la naturaleza curvilínea de la totalidad de la trayectoria (salvo en el caso, naturalmente, de que el lanzamiento fuese vertical).

Otra figura relevante en la Italia del siglo XVI fue Giovanni Battista Benedetti. Publicó en 1554 su *Demonstratio proportionum motuum localium contra Aristotelem*, criticando la teoría aristotélica de la caída de graves, que extendería más adelante en su *Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber* (1585). Como se ha visto, Aristóteles establecía, a igualdad de resistencia del medio donde se efectuaba el movimiento, una proporcionalidad directa entre el movimiento y el peso. Los filósofos medievales habían matizado esta noción de peso, admitiendo que el peso del cuerpo (y por tanto su movimiento) estaba determinado por la combinación de todos los elementos que lo integran. Es decir, que la gravedad era aditiva (y la levedad sustractiva), dando en conjunto una gravedad (o una levedad) total para el cuerpo en cuestión.

Benedetti afirmará, en cambio, que la gravedad y la levedad son conceptos relativos. Por un lado, en la caída entra en juego, no el peso global del cuerpo, como se había venido considerando, sino su peso específico (lo que en la ciencia de los pesos medieval se conocía como *gravitas secundum species*); por otro, sólo debe considerarse el exceso del peso del cuerpo sobre el peso de un volumen igual del medio en el que se desarrolla el movimiento. Para probar lo primero considera una bola de cuatro kilos y cuatro bolas de un kilo juntas (pero no unidas entre sí); si se dejan caer, el centro de gravedad de la bola de cuatro kilos caerá con la misma velocidad que el centro de gravedad de las cuatro bolas de un kilo. Luego una bola de cuatro kilos cae con la misma velocidad que otra de uno. En cuanto a su segunda afirmación, se apoya en la hidrostática de Arquímedes.

En consonancia con esto, Benedetti rechaza tanto la existencia de un «lugar natural» como la distinción entre movimientos naturales y violentos. Pues el movimiento de un cuerpo responde sólo a la diferencia entre su densidad y la del medio que le rodea; si esta última es menor, el cuerpo caerá; en caso contrario, ascenderá.

Figura 2.5. N. Tartaglia, *Nova scientia* (1537).

También atacará otro punto clave del sistema aristotélico: la negación del vacío. Una de las pruebas que Aristóteles presenta para demostrar la imposibilidad del vacío es que en él, carente de resistencia, el movimiento sería instantáneo, infinito. Los comentaristas de su obra, aun aceptando la inexistencia del vacío, discutieron hipotéticamente esta conclusión. ¿No es la carencia de resistencia del éter la que posibilita la revolución sin fin de los orbes celestes? ¿Y no es esta revolución un movimiento finito?. Consideremos, de acuerdo con la matización de la noción de peso de Aristóteles efectuada en la Edad Media, que un cuerpo compuesto por elementos pesados y leves, aunque con predominio de los primeros, cae con un movimiento proporcional al exceso de su gravedad respecto de su levedad. En tal caso, la levedad actúa como una suerte de resistencia interna del cuerpo a su movimiento. En el vacío, esto es, en ausencia de resistencia externa, aquélla todavía persiste; luego el movimiento es finito. Todavía más, dos cuerpos del mismo material, pero de distinto tamaño (y por consiguiente de distinto peso) caerán en el vacío con la misma velocidad. Pues en cada una de sus

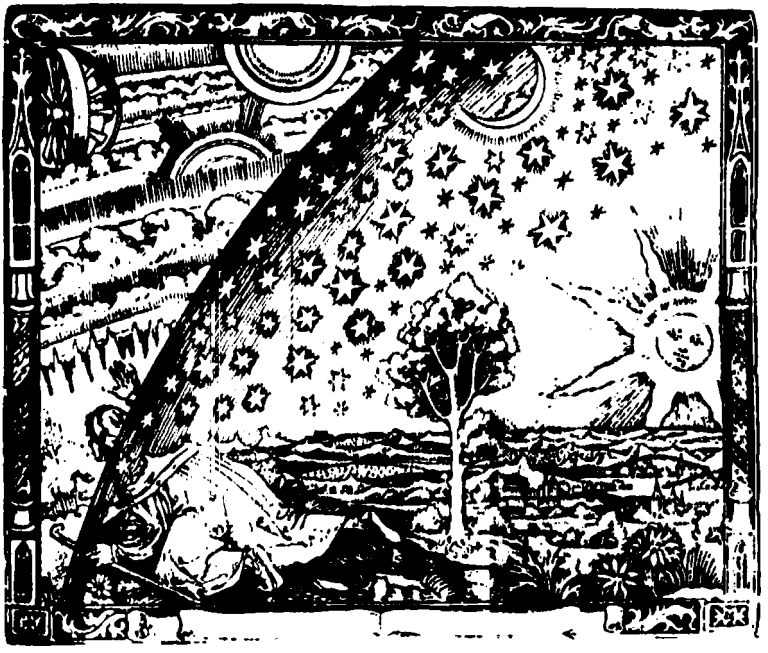


Figura 2.6. El problema planteado por Arquitas, amigo de Platón, con respecto a la finitud del universo es que, llegado a su límite, siempre se podría extender la mano más allá. La respuesta de los aristotélicos es que tal cosa sería imposible, dado que más allá del límite no existe el *lugar*. De Camille Flammarion, *L'atmosphère* (1886).

partes, la proporción entre elementos graves y leves es la misma. Esta conclusión defiende Benedetti, añadiendo que, si los cuerpos son de distinto material, caerán con una velocidad proporcional a sus pesos específicos.

Tartaglia y Benedetti son elementos destacados del nuevo movimiento que se está produciendo en la ciencia. Por un lado, ésta se aproxima al estudio de los problemas prácticos de la realidad inmediata; por otro, siguiendo el modelo arquimediano, se matematiza. Pero ahora debemos dejar en suspenso estos problemas (se retomarán en el Capítulo V), y dirigir la mirada a los cielos.

3.

La astronomía copernicana

La teoría heliocéntrica de Copérnico se tiene por el núcleo en torno al que se desarrolló la Revolución Científica, pero inicialmente no fue tan innovadora como llegó a ser a manos de Kepler y Galileo, como se verá en los capítulos siguientes. En principio la astronomía era una ciencia matemática orientada a construir modelos geométricos para generar las posiciones de los astros, sin prestar mucha atención a los materiales de que constan ni a las fuerzas que los mueven, problemas estos de carácter físico tratado por otras personas con métodos no matemáticos. Absorbidos por sus objetivos técnicos, los astrónomos se acostumbraron a tomarse licencias geométricas, incluyendo en sus *teóricas* (como decían nuestros clásicos) algunos expedientes útiles para generar posiciones correctas aun cuando no tuviesen un significado físico o real claro.

La teoría de Copérnico proponía el movimiento terrestre, algo absurdo para la experiencia común del s. XVI; pero eso no hubiera sido tan traumático si no fuese porque achacaba los fallos de las teorías anteriores a esa costumbre de incluir trucos de cómputo físicamente infundados. Aun así, los astrónomos profesionales llegaron a usar su teoría tomando el movimiento de la Tierra como uno de esos expedientes irreales pero efectivos para el cómputo (del estilo de decir que en el Kalahari hay 0,25 habitantes por kilómetro cuadrado, siendo así que un cuarto de cuerpo humano es un despojito y no un habitante).

Sin embargo, la inquietud intelectual de que se hablaba en el Capítulo I, el culto astral y solar del neoplatonismo, la metafísica de la luz que se expande desde el centro creando el mundo y la insistencia en la estructura

matemática del cosmos, unidos a las críticas al aristotelismo de las escuelas, llevó a algunos espíritus en exceso libres, como Bruno o Campanella, a abrazar el copernicanismo físico. Otros, no menos neoplatónicos, pero más científicos, como Kepler, tomaron las armonías puestas de manifiesto por Copérnico como signo inequívoco de la verdad de su doctrina: las matemáticas y la física no eran disciplinas separadas, sino que se debían practicar a la vez. Este fue el mayor impacto del copernicanismo, pues al tiempo que Kepler llevaba la física a las matemáticas (la astronomía), Galileo llevó las matemáticas a la física del movimiento, siendo ambas jugadas a las que realmente formaron el meollo de la Revolución Científica.

3.1. La astronomía ptolemaica

Los antiguos no iban por la noche a las discotecas ni polucionaban sus ciudades con iluminación artificial, de modo que tenían una familiaridad con los fenómenos del cielo nocturno de la que nosotros carecemos. Lo primero que se observa en la bóveda estrellada es que esos puntos de luz no mudan sus posiciones relativas, unas respecto a las otras, por lo que se llamaron estrellas fijas. Pero el conjunto giraba de Este a Oeste a lo largo de la noche en torno a un punto hoy próximo a la Polar, a un ritmo de una vuelta por día. (En realidad, como sabemos ya, es la Tierra la que gira cada 24 horas y somos nosotros los que proyectamos nuestro movimiento sobre ellas.) Esa bóveda de puntos fijos era el trasfondo de todos los demás fenómenos celestes.

El Sol, la Luna y los planetas participan de ese movimiento diario (salen y se ponen todos los días, dado que somos nosotros los que giramos), pero tienen además un movimiento propio que dura su «año» y que va de Oeste a Este. Por ejemplo, el Sol recorre el Zodiaco en sentido contrario al movimiento diario hacia Occidente de todos los astros, avanzando casi un grado al día, pasando aproximadamente un mes en cada constelación (pues tienen 30.º). El caso del Sol es relativamente sencillo, pues su movimiento no es más que el movimiento anual de la Tierra proyectado sobre él. Pero en el caso de los astros «errabundos» (que es lo que significa *planetes* en griego) la situación se complica enormemente, pues además de esa proyección del movimiento terrestre poseen un movimiento anual propio real. El resultado sobre lo que se ve desde la Tierra constituye un buen lío.

Primero están los movimientos en latitud, arriba y abajo de la banda zodiacal, provocados porque los planos que contienen la órbita de la Tierra y de los planetas se cortan formando un pequeño ángulo, de modo que el planeta está unas veces por encima y otras por debajo de la eclíptica, que es el supuesto camino del Sol entre las fijas.

Luego están los movimientos en longitud, de Oeste a Este en torno a la Tierra, que se reiteran periódicamente de manera regular. Si se dividen los

360 grados de una vuelta completa por los días que se emplea en ello, se tiene el movimiento medio diario del planeta. Ese movimiento medio sería real si los planetas fueran chicos decentes, pero son unos perdidos. Una primera anomalía que presentan es una variación en la velocidad orbital que, ya lo veremos, se podía tratar por ejemplo con una excéntrica y un ecuante.

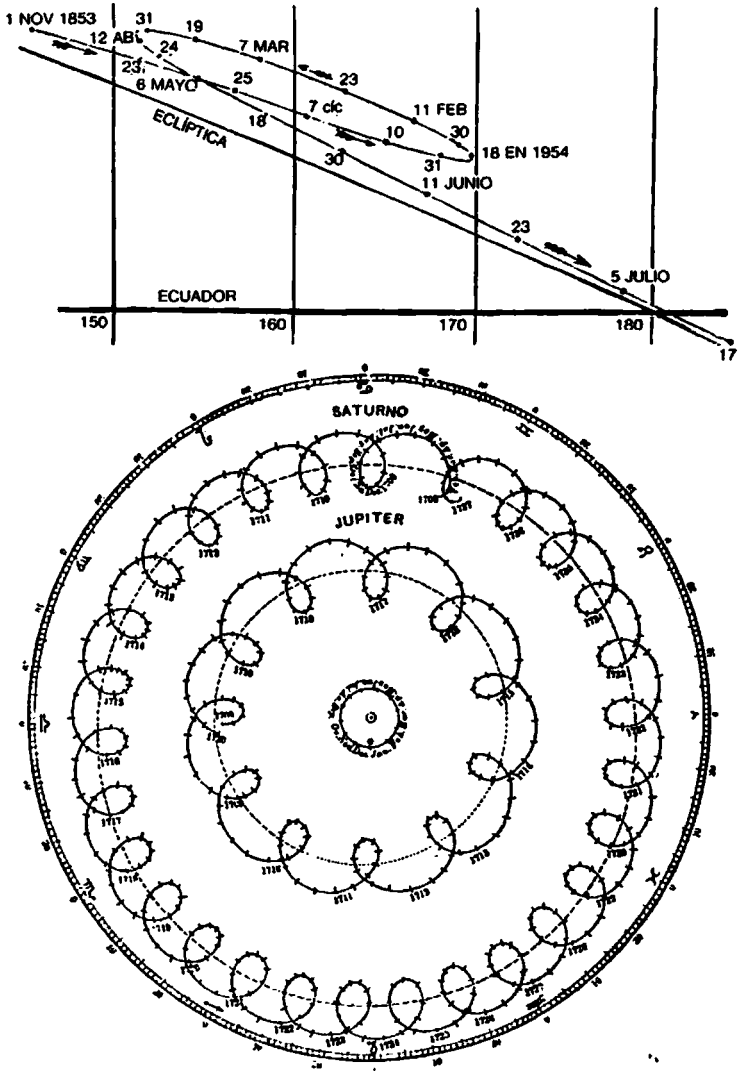


Figura 3.1. *a)* Trayectoria aparente de Marte visto desde la Tierra contra el trasfondo de las estrellas fijas, entre noviembre de 1853 y julio de 1854. *b)* Orbitas epicíclicas aparentes de Júpiter y Saturno descritas desde una Tierra en posición central.

Como sabemos hoy, los planetas giran en elipses en cuyo centro no hay nada, aunque el Sol está en uno de los focos, de modo que los acelera cuando pasan cerca de él. Pero una segunda anomalía era mucho más espectacular. Estaba ligada al período sinódico del planeta (el que media entre dos oposiciones o conjunciones con el Sol: es decir, cuando están a 180º del Sol o en la misma dirección), y hacia que éste decelerara dramáticamente su marcha media a Oriente, llegado a detenerse durante unos días e incluso a retroceder, para detenerse de nuevo y reiniciar su acelerada marcha normal a Oriente, trazando en el cielo un bucle como se ve en la Figura. La explicación física de esta conducta errática hubo de esperar a Copérnico (es un efecto óptico trivial derivado de que los planetas se ven desde un observatorio en movimiento, la Tierra, como se explica en la figura 3.5.), pero mientras tanto su mera descripción geométrica fue el problema fundamental de la astronomía.

* * *

La astronomía griega era una astronomía de posición orientada a predecir los lugares que ocupan los astros. Se desconocían las posiciones absolutas, pero los lugares se indicaban mediante distancias angulares respecto a un sistema de coordenadas estelares (como cuando damos la latitud y longitud de una ciudad en grados). Las observaciones se hacían a simple vista con instrumentos pequeños como el *gnomon*, una escuadra dividida, de manera que no resultaban excesivamente precisas según normas actuales. Todavía Copérnico se daba con un canto en los dientes ante una precisión de 10' (que es muy aproximadamente como vemos el diámetro de la pupila de la pareja sentada frente a nosotros en un restaurante moderadamente iluminado).

Por supuesto, la descripción de todos los fenómenos se hacía desde la Tierra, que estaba inmóvil según todas las apariencias de la época. La astronomía podía considerarse una parte integrante de las matemáticas y no de la física porque todos sus fenómenos están *descarnados*, son puntos (o pueden reducirse a tales) contra un fondo neutro: no se inmutan, no perecen ni se engendran (no había noticias de novas o manchas en el Sol, como se verá en el Capítulo IV), casi no son ni materiales, sino de luz. Así el astrónomo encuentra cumplido el trámite que según Aristóteles debe realizar el matemático: «antes de comenzar la investigación, elimina las cualidades sensibles como el peso o la ligereza, el calor o el frío, dejando sólo lo cuantitativo» (*Metafísica*, 1061a, 29).

Desde finales del IV a. C. los babilonios componían los complejos fenómenos cíclicos de los astros por medios algebraicos, intercalando sucesiones correspondientes a ciclos elementales. Pero los griegos preferían los métodos geométricos que en principio ofrecían una imagen visual de la estructura y mecanismos celestes. Su idea básica era suponer que los astros, que

son perfectos cuando no divinos, se mueven reiteradamente de la manera más simple: circular y uniforme. El matemático consciente debía componer las más complejas apariencias a bas de movimientos armónicos simples, como recomendaba Platón.

Por ejemplo, las estrellas no se mueven entre sí, por lo que se llamaron «fijas», sino que giran conjuntamente cada día en torno al Polo celeste. Así, la teórica de las fijas consistiría en un modelo geométrico trivial: una esfera cristalina concéntrica con la Tierra que gira hacia el Este una vez diaria, llevando las estrellas en su superficie.

Era un esquema prometedor. El Sol gira en torno a la Tierra diariamente, de manera que si se conecta a las estrellas fijas, se resuelve el problema. Pero el Sol no tiene exactamente el movimiento de las fijas, pues cada mes del año sale por una constelación distinta de las que forman el Zodiaco, una banda inclinada 23º 30' respecto al ecuador celeste. Pues bien, se introduce una esfera con el eje inclinado en esa medida respecto al eje de la esfera de las fijas, que gire hacia el Oeste una vez al año.

El lector habrá captado la idea: un movimiento circular y uniforme de una esfera para cada fenómeno periódico. ¿Algún otro problema con el Sol? Sí, la desigual duración de las estaciones. Aceptar una variación en la velocidad del Sol sería abandonar demasiado pronto la idea básica de componer las apariencias con movimientos simples. De hecho esa variación *aparente* se puede producir mediante un par de esferas más con velocidades uniformes y ejes convenientemente dispuestos, cuyos detalles ahorramos. El problema es que eso produce un movimiento en latitud (arriba y abajo del

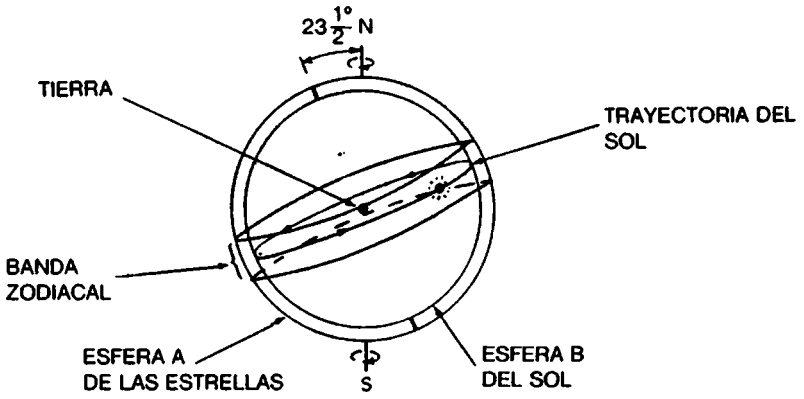


Figura 3.2. Modelo homocéntrico solar. La esfera A posee el movimiento de las estrellas, girando a Occidente una vez al día sobre un eje orientado al Polo estelar. La esfera B, que lleva al Sol en su ecuador, gira anualmente en sentido contrario sobre un eje engastado en la esfera A, con cuyo eje forma un ángulo de 23½.º Desde la Tierra, el Sol parece avanzar lentamente hacia el Oriente a lo largo del año (casi 1º diario) por el medio de las constelaciones del Zodiaco.

Zodíaco) que no se observa, aunque en el caso de los planetas daba buenos resultados. Pero nadie abandona un esquema que funciona porque tenga algunos problemillas que siempre se confía en llegar a superar.

El caso de los planetas es más duro, pues además del movimiento diario de las fijas y el anual en sentido contrario, oscilan arriba y abajo y, lo más pintoresco, a veces parecen detenerse y aun retroceder para avanzar de nuevo. Eudoxo (s. IV a. C.) obtuvo un gran éxito al construir un modelo geométrico a base de cuatro esferas concéntricas con movimientos uniformes y circulares que imitaban cualitativamente las apariencias erráticas. Como todo en esta vida, no era una imitación perfecta, aunque se estimaba que todo era cuestión de enredar con los parámetros hasta conseguir un buen acuerdo con los datos. Sin embargo había un problema en principio insalvable con los modelos a base de esferas homocéntricas con la Tierra situada en el centro del universo: la variación del brillo de Venus o Marte. Sosigenes cuenta que para Aristóteles eso parecía indicar un cambio periódico de las distancias, pues no se iba atribuir el fenómeno a una variación intrínseca de los planetas, que eran perfectos e inmutables. Además, la Luna o el Sol cambian de tamaño aparente, pues en los eclipses de éste, a veces la Luna lo cubre entero y otras, no; y no vamos a decir que engordan y adelgazan.

Un par de siglos más tarde se seguía manteniendo la idea básica de combinar movimientos armónicos simples para salvar las apariencias, pero se introdujeron herramientas más versátiles geométricamente, aunque físicamente un tanto más inverosímiles, lo que acentuó el divorcio profesional entre astrónomos y físicos, cada uno con problemas y técnicas distintas. La primera modificación consistió en olvidar las esferas cristalinas homocéntricas para emplear cualesquiera circunferencias y movimientos uniformes. Así, el mero expediente de usar un círculo excéntrico, uno con el centro un tanto alejado de la Tierra, permitía dar cuenta de las diferentes longitudes de las estaciones o de los acercamientos y alejamientos cíclicos. Veamos algunos ejemplos.

Hacia el III a. C., el matemático Apolonio desarrolló dos técnicas para atacar problemas astronómicos, aunque no se aplicaron hasta el siglo siguiente, cuando Hiparco dispuso de datos de origen babilonio. Esas técnicas eran la excéntrica y el epiciclo sobre deferente.

En el primer caso, el cuerpo P se mueve circular y uniformemente en torno a un centro C, separado de la Tierra, T. Desde ella *parece* cambiar de velocidad, pues aunque los ángulos b, b' sean iguales, a < a', por lo que, en tiempos iguales, en el perigeo, cuando está más cerca de la Tierra, P parece recorrer arcos mayores que en el apogeo, cuando está más lejos. Eso puede acomodar v.g., la variación aparente de la velocidad del Sol a base de movimientos simples. Si luego se hace que C gire en un pequeño círculo en torno a T, se aumenta la versatilidad matemática a costa de la credibilidad física, pues los puntos geométricos están vacíos de materia y relevancia física. Pero

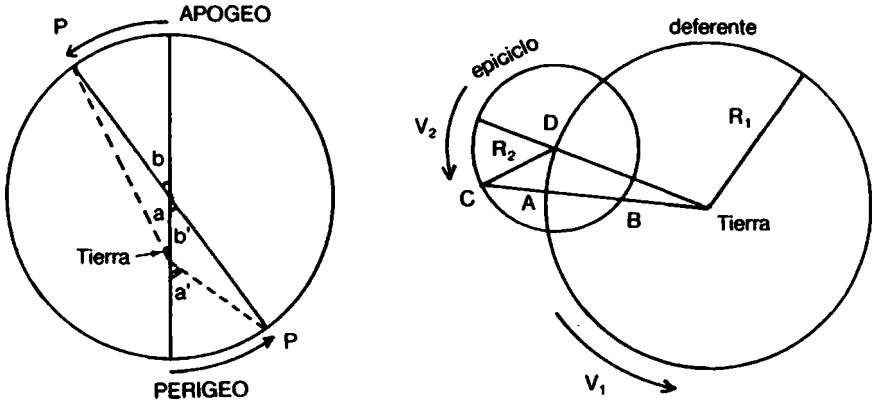


Figura 3.3. *a)* Modelo de excéntrica. *b)* Modelo de epiciclo.

a estas alturas los astrónomos apreciaban más unas buenas técnicas que su buena conciencia filosófica.

Normalmente se usó la excéntrica para el movimiento general por la eclíptica, aunque para las retrogradaciones era preferible el modelo epicíclico, geométricamente equivalente al anterior. En él D gira por el círculo llamado deferente en torno a la Tierra, T, mientras que el planeta P lo hace por otro círculo llamado epiciclo, centrado en D, con lo que alternativamente va en el mismo sentido y en sentido contrario a D. Ajustando convenientemente parámetros como la razón entre radios, R_1 / R_2, entre las velocidades de D y C, v_1 / v_2, o los sentidos de giro, se puede aproximar cuanto se desee cualquier curva; incluso una recta. O una elipse, por ejemplo, haciendo $v_1 = v_2$, aunque de sentido contrario. Otro teorema interesante es que si $\frac{1}{2}$ CB / BT = v_1 / v_2, el punto B es el de estacionamiento. La flexibilidad de estas herramientas es enorme aunque sean forzadas físicamente, pues no se ve cómo sabe el planeta en torno a qué girar uniformemente ni qué produce tal movimiento. Pero astronómicamente sólo se necesitaban datos precisos para producir teóricas exactas.

Veamos de qué manera procedía Ptolomeo en el II d. C. con los planetas. Estos se dividían en dos categorías, la de los inferiores (Mercurio y Venus) y la de los superiores (Marte, Júpiter y Saturno), separados por la órbita del Sol. El orden de los astros (la Luna, Mercurio, Venus, el Sol, Marte, Júpiter y Saturno) era convencional, pues no había modo de averiguarlo, excepto en el caso de la Luna, que eclipsa al Sol. Pues bien, ambos tipos de planetas exigían diferentes modelos (no hubo explicación para ello hasta que Copérnico mostró que los inferiores los vemos desde fuera de sus órbitas y los superiores, desde dentro). Los inferiores no tienen exactamente el mismo modelo geométrico, como ocurre con los superiores, porque Mercurio tiene una órbita demasiado excéntrica y es intratable, pero tanto él como Venus

tienen un epiciclo que viene a representar su órbita en torno al Sol, del que nunca se apartan más de 27° y 47° respectivamente (que son los radios aparentes de sus órbitas, con lo que nunca están en oposición, *vide* figura 3.9.), mientras que el deferente, que alinea el centro del epiciclo con el Sol, viene a representar el movimiento del Sol, vale decir de la Tierra.

Ejemplificaremos las teóricas ptolemaicas con los planetas superiores, los cuales usan el mismo modelo con diferentes parámetros. En ellos la situación es más bien inversa a la que se daba con los inferiores. Los fenómenos sinódicos ligados al Sol (en realidad a la Tierra), como retrogradación-perigeo-oposición y movimiento directo-apogeo-conjunción, están servidos por un epiciclo. Su centro se mueve por un deferente excéntrico que acomoda el movimiento medio por la eclíptica (debido en realidad a su órbita circunsolar). Véase la figura 3.4.

El círculo mayor representa la eclíptica, respecto a cuyo punto Vernal o equinoccio de primavera, γ (Aries), se miden las longitudes celestes, como λ_0 que da la orientación de la línea de ábsides, AA', determinada por TOE. T es la Tierra, centro del mundo y del círculo eclíptico; O, separado de T por la excentricidad *e*, es el centro del deferente por el que se mueve C, que es el centro del epiciclo por el que viaja el planeta P, por ejemplo Saturno. El movimiento de C no es uniforme respecto al centro del mundo, T, ni respecto al centro geométrico de su órbita, O, sino respecto al punto ecuante E,

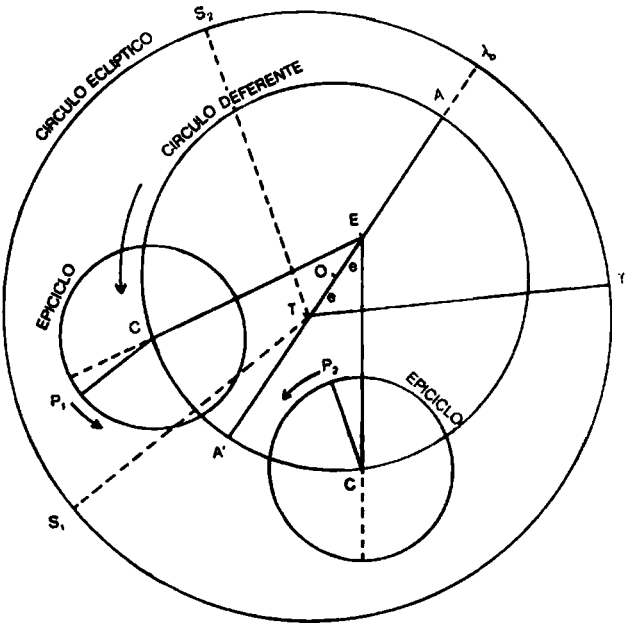


Figura 3.4. Modelo geométrico típico de los planetas superiores.

de manera que resulte la primera anomalía (la variación de su movimiento eclíptico medio visto desde la Tierra). Por su lado, P se mueve en torno a C de modo que PC sea paralelo a TS, la dirección de la Tierra al Sol medio, de manera que se de lugar a la segunda anomalía (las variaciones que producen las detenciones y retrocesos).

Así, en torno a la conjunción con S_1, P_1 se mueve directamente, hacia Oriente, y se halla en el apogeo. Poco después de medio año (por encima de Marte los periodos sinódicos exceden en unos días el año), P_2 estará en oposición a S_2 y en el perigeo, moviéndose retrógradamente hacia el Oeste. Finalmente, en torno a las tangentes desde T al epiciclo, el planeta parecerá estacionario. La razón heliocéntrica de estos efectos espectaculares de la segunda anomalía se puede ver en la siguiente figura 3.5.

Con Ptolomeo se tuvieron por primera vez teóricas planetarias, además de la solar y lunar, capaces de funcionar con precisión cuantitativa, confiando en que el ajuste de los parámetros podría acomodar cualesquiera discrepancias con los fenómenos observados.

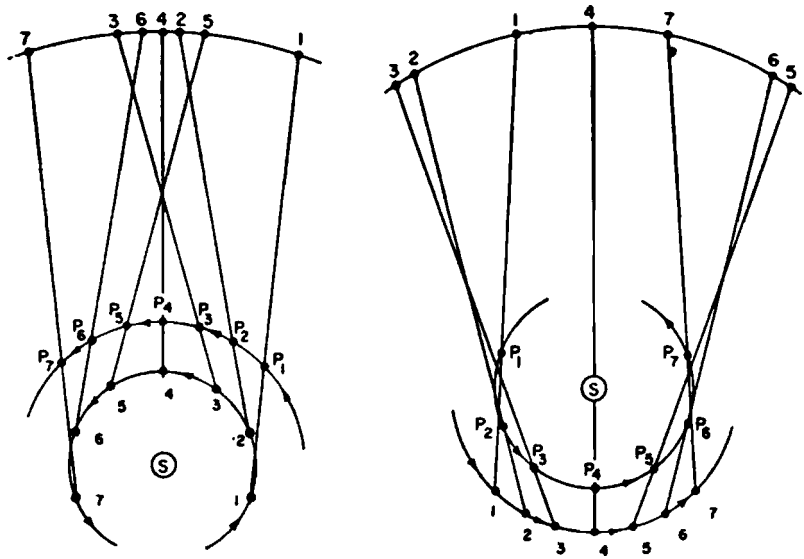


Figura 3.5. Según Copérnico, las retrogradaciones son un mero efecto óptico derivado de observar los planetas desde una Tierra en movimiento. Los planetas más próximos al Sol van más deprisa, de manera que la Tierra adelanta a los superiores mientras que se ve adelantada por los inferiores. La Tierra se mueve de T_1 a T_7 mientras los planetas van de P_1 a P_7, pareciendo moverse entre las estrellas hacia el Este entre 1 y 3, hacia el Oeste (retrógradamente) entre 3 y 5, y de nuevo al Oriente de 5 a 7. (Tomado de T. Kuhn, *The Copernican Revolution*, 1957.)

3.2. La astronomía árabe y cristiana

Después de Ptolomeo, las condiciones sociales hicieron decaer la investigación científica. Los primeros en retomarla fueron los árabes, quienes inicialmente se limitaron a estudiar respetuosamente el *Almagesto* de Ptolomeo. En este libro se explica cómo usar los datos para derivar los parámetros de sus modelos planetarios, pero el método usado por Ptolomeo para derivar inicialmente esos modelos de las apariencias estaba implícito y nadie sabía cómo hacerlo. El respeto a Ptolomeo era tal, que incluso cuando en el s. IX obtuvieron mejores parámetros solares, como la precesión de los equinoccios, creyeron simplemente que eran variables y no constantes, lo que se habría tornado patente por el transcurso de cerca de un milenio.

La recepción conjunta de la física aristotélica y las matemáticas ptolemaicas hizo especialmente difícil aceptar su divorcio. Además el sabio árabe, el *hakīm*, abarcaba tradicionalmente todo el saber, por lo que la esquizofrenia de las exigencias físicas y matemáticas era más difícil de soportar. Había ciertamente algunos, como al-Bīrunī que multiplicaban barrocamente epiciclos sobre epiciclos preocupados tan sólo por mejorar el acuerdo entre los modelos y las apariencias; pero muchos otros deseaban vivamente hacer matemáticas ajustándose realmente a movimientos circulares y uniformes. Uno de ellos, Ibn al-Haytam (Alhazén), escribió en el XI unas *Dudas sobre Ptolomeo* donde protestaba porque el epiciclo sobre deferente daba a los astros, cuerpos simples, un movimiento que no era realmente una simple circunferencia, mientras que el ecuante hacía que sus movimientos no fuesen *realmente* uniformes. Además señalaba que estas licencias falsas eran señal de que Ptolomeo no había dado con la *verdadera* constitución del Mundo, por más que sus modelos imitasen aceptablemente las apariencias.

Los árabes reaccionaron de dos modos a este diagnóstico. En los siglos XII y XIII, algunos aristotélicos, especialmente andaluces, revivieron las esferas homocéntricas, lo que equivalía a renunciar a cualquier teoría astronómica técnicamente aceptable. Sin embargo, en los siglos XIII y XIV, algunos astrónomos matemáticos ingeniaron un sistema de hacer compatible su oficio con las exigencias del realismo físico. Los astrónomos de Maraġa, la capital mogol, en Persia, lograron por vez primera crear modelos no ptolemaicos que eran matemáticamente precisos y físicamente menos objetables. Todo ello se basaba en el descubrimiento del par de Nasīr ad-Dīn at-Tusī (figura 3.6.).

Si se monta esto en los modelos ptolemaicos (un problema técnico en el que no podemos entrar aquí), se obtienen otros equivalentes en los que todos los círculos se mueven uniformemente en torno a sus centros. Esta es la misma motivación que moverá a Copérnico, quien sin duda tuvo noticia de la escuela de Maraġa, pues usa sus modelos. Sin embargo, los astróno-

mos profesionales siguieron desentendiéndose de la coherencia física. El observatorio de Samarcanda (s. XV) fue el acmé de la astronomía árabe. En él se usaron cuadrantes de hasta 40 m con los que confeccionaron excelentes Tablas que no llegaron a Europa hasta el s. XVII. Pues bien, sus astrónomos continuaron con los modelos ptolemaicos porque los de Maraga no eran técnicamente mejores.

Los cristianos siguieron los pasos de los árabes con tres siglos de retraso. Hasta el s. XII no empezaron a estudiar a los clásicos, que ahora incluían a los árabes, y hasta el s. XV no dominaron la técnica, sobre todo en Praga, Cracovia y Viena, gracias a los esfuerzos humanistas de Peuerbach y Regiomontano. Existían además presiones por la reforma del calendario, pues Sosígenes había calculado el año para el calendario juliano con un error de 11,25 minutos, lo que con el paso de los siglos había hecho que la primavera entrada el día 11 de marzo, descabalando la Pascua. Además, la navegación oceánica iniciada por los portugueses exigía mejores Tablas y espoleaba el trabajo astronómico. Para entonces el neoplatonismo había puesto de moda la astrología y preconizaba la estructura matemática del mundo físico, lo que agudizó la tendencia, que está en la base de los esfuerzos de Copérnico, a tratar como uno los problemas de físicos y matemáticos.

A estas alturas, los vieneses dominaban a los árabes y griegos hasta el extremo de convencerse de que el progreso de las astronomía no estaba en el estudio de las obras del pasado. Por vez primera en trece siglos los cristianos sabían tanto como Ptolomeo y trataban no de estudiarlo, sino de superarlo.

El *Epitome* (1463) de Regiomontano era más que un compendio del *Almagesto*. Incluyó observaciones nuevas, corrigió sus cálculos y expuso detalladamente los procedimientos de derivar los elementos orbitales. Construyó además tablas de senos e inició planes para fabricar instrumentos y hacer observaciones sistemáticas por vez primera en la cristiandad. Sus observaciones en el observatorio de Nuremberg poseían una precisión de 5' para los planetas y 1' para el Sol, y fueron usadas por Copérnico, Tycho Brahe y Kepler. Las teorías desarrolladas habrían de restringirse a condiciones observacionales más severas.

Así, para comienzos del s. XVI, ya era posible en principio atribuir directamente las insuficiencias de la astronomía a las limitaciones intrínsecas de las teóricas ptolemaicas, en especial a las licencias matemáticas contrarias a los supuestos físicos como ecuantes o centros vacíos. Parece ser que un amigo del hermano de Copérnico, Georg Hartmann, encontró una carta autógrafa de Regiomontano, hoy perdida, en la que dice que «el movimiento de las estrellas ha de variar muy poco por el movimiento de la Tierra». Uno de los argumentos más fuertes contra la hipótesis copernicana era que el movimiento terrestre produciría una variación en la posición de las estrellas, la paralaje, que no se observa (la paralaje en cuestión es el ángulo

que se forma en una estrella con las líneas que van al extremo del radio de la órbita terrestre). Como no se observa, debe ser imperceptible, lo que exige distancias inmensas. (En 1838 Bessel hizo la primera medición de la paralaje de una estrella a 11 años luz.) De este modo, la cita indicaría que el autor se preparaba para enfrentar las dificultades derivadas del uso de modelos heliocéntricos. Se ha especulado con que la carta estaría dirigida a su discípulo Domenico Maria da Novara quien a su vez tuvo un estudiante destacado: Nicolás Copérnico.

3.3. El monstruo y el sistema

En el Prefacio al *De Revolutionibus* (1543), dedicado al Papa, Copérnico explica a Su Santidad qué lo condujo a proponer el movimiento de la Tierra. En primer lugar menciona el hecho de que los astrónomos no fuesen capaces de determinar la longitud del año, pues aún no se había podido corregir el viejo calendario juliano por falta de observaciones y teorías adecuadas. Ahora bien, la duración del año no se obtiene mejor con la teoría copernicana que con la ptolemaica, por lo que esta supuesta ventaja técnica debe tomarse como propaganda. En segundo lugar, cita la diversidad de técnicas geométricas usadas, señal de que no se ha dado con la configuración real de esferas y movimientos, citando en especial el escándalo de la violación de la uniformidad que introduce el ecuante. Esta motivación es mucho más plausible y coincide con los escrúpulos árabes expresados por Ibn al-Haytam casi medio milenio antes.

Una consecuencia de ese proceder oportunista de los matemáticos, consistente en usar hipótesis falsas por conveniencia, es la incapacidad de la astronomía ptolemaica de descubrir «la forma del mundo y la exacta simetría de sus partes». Al estar ingeniadas para una utilidad concreta e inmediata sin tener en cuenta la realidad física, las construcciones pueden dar buenos resultados parciales, pero no encajarán entre sí. Es, dice Copérnico, como si un artista uniese pies, manos, cabeza y otros miembros perfectos en sí mismos, aunque sin relación mutua. En ese caso formaría un monstruo más bien que un hombre.

Se recordará, por ejemplo, que en Ptolomeo la distinción entre planetas inferiores y superiores era convencional, pues al no observarse tránsitos de Mercurio y Venus sobre el Sol, no había criterios de orden. Un sistema coherente y no monstruoso sería precisamente aquél en el que el orden y magnitud de las esferas celestes estuviesen correlacionados, de modo que las libertades de jugar con construcciones geométricas estuviesen drásticamente limitadas. Sólo un modelo puede representar el orden de los astros, aunque muchos puedan *imitar* aproximadamente sus movimientos. Copérnico habría hallado ese orden *verdadero*.

De las dos motivaciones mencionadas, el calendario y el sistema, sólo la segunda llegó a verse satisfecha por obra de Copérnico, si bien da la impresión de que las armonías sistemáticas de su astronomía son más bien una consecuencia inesperada del impulso fundamental: respetar los primeros principios de movimientos ejecutables por esferas en rotación uniforme, que habían definido la astronomía dos milenios antes.

3.4. ¿Un árabe polaco?

Copérnico partió de las mismas preocupaciones que perturbaran a muchos árabes desde el siglo XI. Hacia 1510, un tercio de siglo antes del *De revolutionibus*, compuso un breve opúsculo sobre los movimientos celestes titulado *Commentariolus*. En él expuso el núcleo de su teoría cuando aún no había realizado las observaciones que permitiesen derivar los elementos necesarios para construir sus teóricas. A estas alturas, justifica su propuesta sin aludir para nada a las necesidades técnicas de la astronomía matemática. Señala que las teóricas de Ptolomeo «guardan un perfecto acuerdo con los datos numéricos». ¿Por qué intentar entonces una modificación de las mismas que implica algo tan absurdo como el movimiento terrestre? Porque aquellas teóricas entrañaban «imaginar ciertos ecuantes, en razón de los cuales el planeta parece moverse con una velocidad siempre uniforme, pero no con respecto a su deferente ni tampoco con respecto a su propio centro». Por tal motivo se propone como tarea dar cuenta de las apariencias igual de bien que Ptolomeo, pero «sin tener que postular movimiento alguno distinto del uniforme alrededor de los centros correspondientes, tal como exige el principio del movimiento perfecto».

Las motivaciónes de Copérnico son exactamente las de los astrónomos de Maraġa. Y no sólo las motivaciones, también las soluciones. Nadie ha encontrado un manuscrito árabe cosido al forro de la casaca de Copérnico, pero tiene que haber conocido algunos escritos o traducciones griegas con los trabajos de los astrónomos de Maraġa; o alguien que los había leído se lo comunicó con detalle, pues los modelos no ptolemaicos de Ibn ash-Shaṭir, ash-Shīrāzī o al-ʿUrdī, todos de Maraġa, han dejado honda huella en las teóricas de Copérnico.

Consta que en el s. XV llegaron a Italia, a través de los bizantinos, algunas traducciones griegas en que se daba cuenta de los logros de Maraġa. Copérnico estuvo en Bolonia a finales del XV y en Padua de 1501 a 1503. De manera que tuvo que enterarse de casi cualquier cosa que se supiera por allí. De hecho, por los años en que Copérnico publica el *De revolutionibus*, un aristotélico publicó en Padua un tratado muy mediocre en el que usaba el par de at-Ṭūsī (figura 3.6.) para eliminar ecuantes y epiciclos. Parece muy plausible que en Padua se conociese la obra de los de Maraġa.

De modo que el *Commentario lus* ce plenamente en dicha tradición, consistente en conservar las capacidades generativas de los modelos de Ptolomeo sin libertades con los giros uniformes de las esferas materiales que arrastran las circunferencias de los matemáticos. No duda nunca, no ahora ni en la obra madura, de la bondad descriptiva de los modelos ptolemaicos, hasta el punto de que, en su *Astronomia nova* (1609), Kepler dirá que Copérnico busca expresar a Ptolomeo más bien que a la naturaleza; esto es, sus modelos reproducen los resultados de Ptolomeo más bien que los fenómenos. Su única novedad es que lo hace con fidelidad a la ortodoxia de movimientos simples.

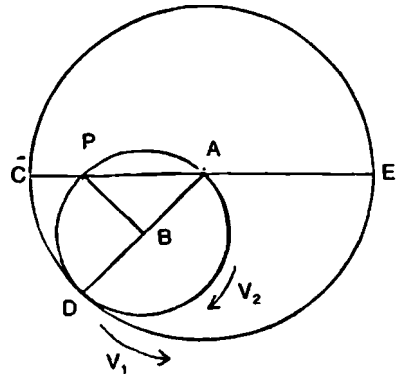


Figura 3.6. El par de aṭ-Tuṣī. Si AE = 2BA y si $V_2 = 2V_1$, el punto P oscila por el diámetro CE.

Las notas conservadas en su ejemplar de las *Tablas alfonsíes* muestran que antes del *Commentariolus* estaba tratando de seguir las lineas indicadas por Regiomontano para convertir los modelos epicíclicos en excéntricos, pues llama «excentricidad» al radio de los epiciclos. Probablemente Copérnico estuviese insatisfecho con los modelos de Maraġa porque, aunque solucionaban adecuadamente la primera anomalía, el movimiento otorgado al planeta por el epiciclo, a fin de dar cuenta de la segunda anomalía, aún dependía del ecuante, violando la rotación uniforme de la esfera que lleva al epiciclo.

En la figura 3.7. se da una reconstrucción de cuál pudo ser el camino seguido por Copérnico en el tratamiento de la segunda anomalía. En (a) tenemos un modelo epicíclico de los planetas superiores en trazo continuo y su transformación excéntrica en trazo discontinuo, merced a la equivalencia de los vectores TC + CP y TN + NP, con el viejo radio del epiciclo, *r*, convertido en excentricidad, *e*. Antes, el radio del epiciclo, CP, era paralelo a la dirección al Sol medio, TS, para dar cuenta de la segunda anomalía; pero como ahora N y S se hallan alineados y no se sabe cuál es la distancia SN, ¿qué pasa si se hace nula y se pone a S en N? Visualmente, nada, y el resultado es un modelo tipo Tycho Brahe (*vide* figura 4.3. del capítulo siguiente), en el que el Sol, con los planetas en torno, gira alrededor de la Tierra con su Luna.

En (b) tenemos lo mismo para los planetas interiores: en línea continua el modelo epicíclico y en discontinua el equivalente con excéntrica móvil. La alineación del cetro del epiciclo con el Sol medio desaparece, pero si se

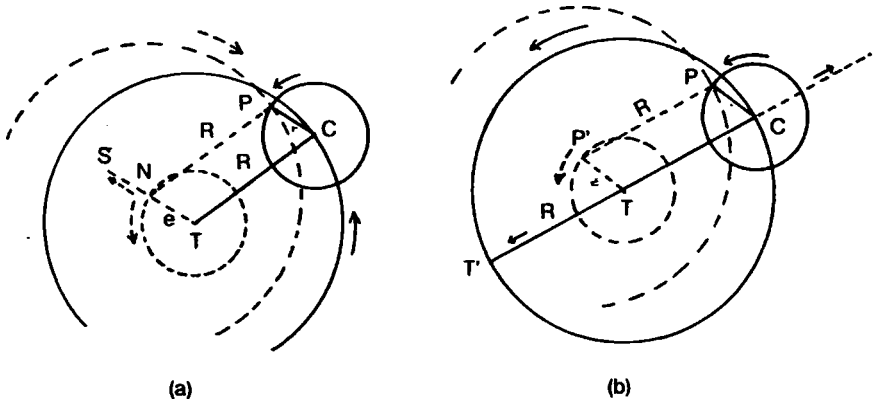


Figura 3.7.

traslada T a T', su lugar lo ocupa el Sol y P va a dar a P', tendremos un modelo heliocéntrico en el que T'C es la órbita terrestre, el planeta gira por la antigua excéntrica con e = r y el Sol ocupa el centro evacuado por T.

A principios del s. XVI un modelo de tipo tychónico resultaba absurdo incluso para Tycho Brahe, pues el radio de Marte, siendo vez y media el del Sol, habrá de cortar su órbita, como se ve en la figura 4.3. De modo que mal se va a asegurar el realismo físico de esferas girando uniformemente cuando estas pasan unas a través de otras sin romperse ni mancharse. Como se verá en el capítulo siguiente, el propio Tycho sólo se convenció de que esta ordenación no era absurda cuando en 1577 analizó la trayectoria de un cometa y vio que atravesaba los supuestos orbes de los planetas sin que pasase nada, perdiendo la fe en las esferas cristalinas.

Sin embargo, la transformación heliocéntrica era un remedio peor que la enfermedad a curar, pues la coherencia física ganada lo era a costa del absurdo de afirmar el movimiento de la Tierra, objeto que a todas luces se mantiene firmemente asentado bajo nuestros pies excepto cuando hay terremoto, avatar asaz conspicuo que explica fehacientemente qué pasa cuando la Tierra se mueve un negro de uña. Realmente tiene mérito haber acertado en este punto, basándose en las armonías descritas en el apartado siguiente.

En el *De revolutionibus*, dice que se animó a emprender esta vía al leer que los pitagóricos sostuvieran el movimiento de la Tierra, argumento no muy fuerte pues se lee de todo y uno sólo hace caso a lo que quiere. Por su parte, la tesis de que el Sol debe estar en el hermosísimo templo central porque Hermes Trimegistos lo llama «dios visible», sólo puede tomarse como una elegancia literaria de humanista, especialmente en el caso de un canónigo con un tío obispo.

3.5. La luz del Sol

Lo que empezó como un ejercicio de asear a Ptolomeo y de atildar a los árabes terminó con un premio espectacular. Primero, el orden y las distancias de los planetas al Sol se obtenían directamente de los modelos heliocéntricos al reinterpretar como razón entre el radio del planeta y el de la Tierra la ecuación de anomalía, que viene a ser el ángulo bajo el que se ve el radio del epiciclo, cuyo seno es una función de los radios del epiciclo y del deferente, que se pueden considerar los radios de las órbitas del planeta y de la Tierra. *Vide* la figura 3.7. (b).

En segundo lugar, conociendo el orden y relación de los astros, se puede elaborar por vez primera en la historia un modelo único para todo el mundo. Hasta ahora cada teórica era un computador separado y el intento de Ptolomeo en *Las hipótesis de los planetas* de montarlos todos juntos estaba lleno de arbitrariedades. Las dimensiones absolutas pueden computarse hasta Saturno y, aunque no sepa cuál es la distancia a la que se halla la esfera de las fijas, se puede estimar cuál es la distancia mínima para que no se observe paralaje alguna. (Por ejemplo, si la resolución de ojo humano a simple vista anda por el medio minuto, eso obliga a distancias mínimas del orden del billón de kilómetros: una bagatela para nosotros, pero un exceso para aquel tiempo.)

En tercer lugar, desveló armonías bellísimas, iluminando los misterios de la distinción entre planetas superiores e inferiores en los modelos ptolemaicos, así como las misteriosas conexiones solares. Desveló la razón de que el centro del epiciclo de los inferiores estuviese siempre en la dirección al Sol, simplemente porque no es un epiciclo, sino el planeta dando vueltas en torno al mismísimo Sol. De paso se explica la limitada elongación máxima de 27° y 47° de Mercurio y Venus respectivamente, porque ese es el mayor ángulo que subtiende su radio desde la Tierra. Figura 3.8. Ese mismo esquema muestra como algo trivial que tales planetas retrograden en la conjunción inferior, cuando adelantan a la Tierra, momento en que se hallan en el perigeo y su brillo aumenta un tanto. Asimismo progresan máximamente en la conjunción superior, cuando se hallan en el apogeo y su brillo se mitiga. Ya hemos visto también la explicación correspondiente para los planetas superiores (véase la figura 3.5. de la pág. 73). Igualmente se explica por qué los planetas más próximos a la

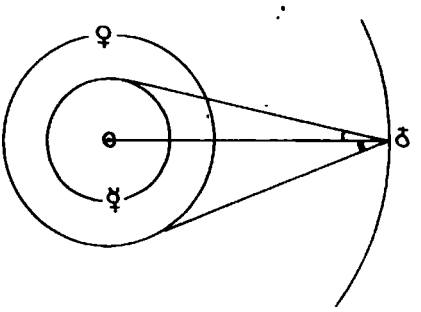


Figura 3.8. Explicación heliocéntrica de la elongación máxima de los planetas inferiores

Tierra (Marte y Venus) poseen mayores periodos sinódicos que los más alejados o por qué los más lejanos poseen mayores ecuaciones de anomalía (ya mencionadas) o mayores arcos de retrogradación (el lector podrá comprobar por sí mismo estos extremos haciendo unos sencillos diagramas).

¿Cómo pensar que estas armonías tan sorprendentes pueden ser fruto de la casualidad? La interpretación más lógica para quien tenga los intereses y la actitud intelectual adecuada es que el heliocentrismo es la disposición propia del cosmos, y por eso todo encaja, se simplifica y ordena a la perfección. Para un astrónomo preocupado por cumplir las exigencias de la física celeste, de la cosmología (la precisión matemática ya estaba conseguida por Ptolomeo), estos argumentos eran terriblemente convincentes.

3.6. Astrónomos y filósofos naturales escépticos

Ahora bien, dar a la Tierra un movimiento anual podía ser desagradable ideológicamente (¿a dónde vamos a parar, dando vueltas por esos espacios etéreos?) pero no tenía por qué resultar demasiado grave. El problema es que si la Tierra se mueve, el giro diurno de las fijas, del Sol, la Luna y todos los planetas no se puede acomodar ya con una esfera de giro diario, y la solución obvia es hacer girar diariamente de la Tierra de Oriente a Occidente, con lo que los otros siete astros *parecerán* caminar al Oeste. Ahora bien, conociendo el radio terrestre desde los viejos tiempos de Eratóstenes, no era difícil computar que un punto del ecuador tendría que viajar a la escalofriante velocidad de casi 1.700 km / h, y eso sin combinar el movimiento diario con el anual. Era más de lo que cualquier persona sensata podía aceptar. Sobre todo cuando uno lee las explicaciones totalmente verbales de Copérnico; la Tierra es redonda por naturaleza, por lo que es *natural* que se mueva circularmente y gire. Si ese es su movimiento natural, no va desintegrarse por efecto de la rotación, cosa que iría contra su naturaleza, etc. En una palabra, Copérnico no tenía nada que decir a favor del movimiento terrestre en el campo de la física de este suelo. Sólo podía decir que si aceptábamos ese movimiento, obtendríamos las perlas armónicas citadas en el apartado anterior. Todos los copernicanos en cosmología lo fueron por estas consideraciones armónicas.

Pero los astrónomos técnicos llevaban mucho tiempo acostumbrados a ocuparse sólo de sus asuntos matemáticos, y como los de Samarcanda respecto a los de Maraga, siguieron con su Ptolomeo. Porque, como se recordará, la teoría de Copérnico no es mejor en este sentido técnico y matemático que la de Ptolomeo. No ha ningún misterio en ello: eso es lo que buscó Copérnico (y los árabes de Maraga) al partir de los modelos ptolemaicos para transformarlos en otros geométricamente equivalentes. Eso indicaba Kepler al decir que Copérnico no se ocupa de la naturaleza, sino de los

modelos de Ptolomeo que tenía por cuantitativamente justos. Casi ningún astrónomo técnico se convirtió nunca al copernicanismo. Además, la propagandística reducción anunciada en el *Commentariolus*, al poder prescindir de los siete epiciclos grandes, quedó anulada en el *De revolutionibus*, donde en aras de la precisión de los computadores se hubieron de montar epiciclos menores sobre otros epiciclos o sobre excéntricas. El dibujo de Copérnico del cosmos con siete capas esféricas concéntricas (figura 3.9.) no es más que un truco propagandístico.

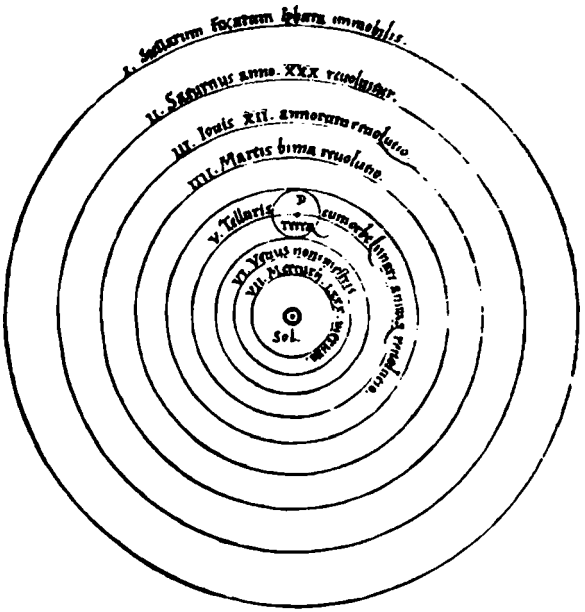


Figura 3.9.

Sin embargo, aunque los modelos copernicanos no fuesen ni mejores ni peores que los Ptolemaicos es este sentido, la astronomía copernicana era globalmente superior a la ptolemaica por una razón obvia. Los parámetros de ésta habían sido recalculados recientemente, muchas veces a partir de observaciones hechas por el propio Copérnico entre 1512 y 1529. En el s. XVI los errores acumulativos de las Tablas del *Almagesto* habían tenido catorce siglos para alcanzar un hermoso desarrollo, y las *Tablas alfonsíes* tenían ya tres siglos de antigüedad. Por consiguiente, dada la equivalencia buscada entre los modelos copernicanos y los ptolemaicos, no es de extrañar que los matemáticos usasen aquéllos sin problemas y sin aceptar la realidad de la ordenación del mundo que entrañaban.

Esta actitud de usar con desparpajo una teoría físicamente sospechosa no era ninguna novedad entre los astrónomos, pero se hizo consciente y explícita en la escuela luterana de Wittemberg, pudiéndose ver un exponente de esta filosofía en el prólogo anónimo que Osiander estampó al comienzo de la primera edición del *De revolutionibus*. (Los jesuitas hacían algo parecido, y uno de ellos, el cardenal Bellarmino, recomendó a Galileo adoptar esta filosofía para evitar poner en peligro su alma; pero como no aceptó, la Iglesia puso en peligro su cuerpo.)

Un astrónomo de Wittemberg, E. Reinhold, compuso unas *Tablas pruténicas* (1551), las primeras puestas al día desde las alfonsíes, basándose para ello en las matemáticas copernicanas. Sin embargo no aceptaba ni por asomo el copernicanismo cosmológico con la Tierra en movimiento. También en 1582 el Papa terminó haciendo la reforma del calendario, sobre la que se había consultado a Regiomontano, basándose para ello en la astronomía copernicana, superior en este sentido, sin que se pueda decir que la Iglesia fuese heliocentrista. Incluso Tycho Brahe, que se oponía por sólidas razones de física terrestre al movimiento de nuestro suelo, era un copernicano sui generis que se dedicó a transponer geométricamente los modelos de Copérnico a los suyos propios.

Estando así las cosas, sólo quienes creían realmente en la capacidad de las matemáticas para encontrar la economía del cosmos podían poner las armonías descubiertas por Copérnico muy por encima de las desventajas del movimiento de nuestro hogar. Uno de ellos fue Kepler, como se verá en el capítulo siguiente, que era tan copernicano que construyó un sistema mejor (por lo que el primer astrónomo copernicano acabó con el copernicanismo). Otro fue Galileo quien (como se verá en el capítulo V) elaboró una nueva física no aristotélica al objeto de que ciertos movimientos no tuviesen efectos observables, aunque fuesen de 1.700 km / h.

3.7. Entre dos mundos

La revolución de Copérnico estuvo motivada por consideraciones muy arcaicas, cual es la fidelidad al principio platónico y aristotélico de movimientos circulares y uniformes de esferas materiales. Se inspiró además en modelos antiguos, como los de los árabes. Dejando de lado la mejora de las observaciones y el cálculo de elementos orbitales, y dejando de lado también las armonías cosmológicas que no son estricto asunto del astrónomo técnico, la astronomía copernicana seguía siendo medieval. Esto es, Copérnico seguía sin ser capaz de hacer lo que Ptolomeo había hecho en el siglo II d. C.: analizar las apariencias fenoménicas para hallar la manera de representarlas geométricamente. Copérnico nunca aprendió a hacer modelos de datos, sino que sólo supo hacer transformaciones geométricas de modelos

ya construidos por Ptolomeo o los árabes, calculando, eso sí, sus parámetros. Como veremos, sólo Kepler, tras cerca de milenio y medio, fue capaz de ponerse a la altura del buen Ptolomeo y confeccionar sus modelos a partir del penoso análisis de los fenómenos.

Como todos los grandes innovadores, Copérnico está entre dos mundos, perteneciendo a uno u otro según bajo qué respecto se considere. Globalmente era más clásico y medieval que moderno, pero su trabajo tenía tales consecuencias implícitas que un siglo más tarde dio lugar a transformaciones matemáticas, astronómicas y físicas que le ganaron retrospectivamente el título de revolucionario y le concedieron el honor de ver su obra en el índice de libros prohibidos. No se pierda los próximos capítulos en los que se cuentan todas estas apasionantes aventuras.

4.

La revolución copernicana

4.1. El universo de los aristotélicos

Los sistemas de esferas desarrollados por Eudoxo y Calipo para dar cuenta de los fenómenos celestes eran entidades matemáticas separadas. Aristóteles las transformó en un sistema físico integrado. Convirtió a las construcciones de los astrónomos en esferas cristalinas reales y conectó físicamente entre sí a los distintos conjuntos de esferas que se habían introducido independientemente para cada planeta. Para conseguirlo debía evitar que el movimiento de las esferas de un planeta se transmitiese, perturbándolas, a las esferas del planeta inmediatamente inferior. Y esto lo consiguió introduciendo entre ellas otras nuevas, dotadas de giros opuestos en una medida tal que las neutralizasen. Las 34 esferas de Calipo se convirtieron así en 55.

Los perfeccionamientos matemáticos de la astronomía ptolemaica, reclamados por la exactitud de las observaciones babilónicas y por la necesidad de dar cuenta de las variaciones en la distancia de los planetas a la Tierra, se avinieron mal con la cosmología física de Aristóteles. No resultaba fácil aceptar la realidad de los epiciclos y las excéntricas. El mismo Ptolomeo, en sus *Hipótesis* de los planetas, trató de reconciliar los formalismos matemáticos con la verosimilitud física. La obra fue desconocida en Occidente, pero parte de su contenido fue recogido en un tratado astronómico de Alhazén, traducido al latín con el título de *Liber de mundo et coelo.* Gracias a ello podía alcanzarse un cierto compromiso, mediante el expediente ptolemaico de encerrar en el estrato u orbe comprendido entre dos

esferas concéntricas límites (superior e inferior), con centro en la Tierra, todo el mecanismo diseñado para cada planeta. En tal orbe —no entraremos en detalles— se situaban las excéntricas y epiciclos que, ahora sí, ya se podían materializar como esferas cristalinas.

De todos modos, se consideraba que este compromiso no iba más allá de salvar las apariencias. Y, por otra parte, los filósofos naturales de la Edad Media no estaban familiarizados con las complejas técnicas de la astronomía, dominadas sólo por unos pocos matemáticos. Así que el problema quedó en suspenso. Las principales discusiones sobre cosmología atañían a temas tales como la eternidad del mundo, la procedencia del movimiento de los orbes celestes (la naturaleza del primum mobile), y la posible existencia del vacío o de lugares más allá de la esfera de las estrellas fijas, todos ellos impregnados de un fuerte matiz teológico.

La aparición del *De Revolutionibus*, como ya se ha apuntado en el Capítulo anterior, no modificó demasiado la situación. Conceder a la Tierra un movimiento real era algo que iba, no sólo contra el sentido común, sino contra todo el sistema de la física aristotélica. La obra de Copérnico, pues, comenzó a aceptarse como una herramienta de cálculo, no como una cosmología. Sin embargo, había quienes deseaban salvar la brecha entre los modelos matemáticos y la realidad física, y éstos no pudieron dejar de encontrar en Copérnico un sistema integrado del cosmos que explicaba algunas cuestiones muy relevantes, tales como la distinción entre planetas superiores e inferiores, la variación de su distancia a la Tierra, o las siempre sorprendentes retrogradaciones. Entre ellos se encontraba Tycho Brahe, un gran artífice de la revolución copernicana (por más que nunca dejase de ser geocentrista) que culminaría con Kepler y Galileo.

4.2. Un observador excepcional

La astronomía es una de esas disciplinas, bien trilladas desde la Antigüedad, en la que no es necesario acumular hecho tras hecho para ver qué sucede. En el Renacimiento, los movimientos celestes estaban ya bien establecidos, y toda la tarea a realizar consistía en algunas observaciones necesarias pero ocasionales para la elaboración de pronósticos y almanaques. La misma teoría de Copérnico vino a cambiar el marco matemático conceptual con que se interpretaban esos datos, pero en este sentido añadió poco de nuevo.

Las efemérides al uso, sin embargo, estaban lejos de responder puntualmente a los fenómenos celestes. No era en absoluto raro que errasen en la predicción de determinados acontecimientos. La conjunción de Júpiter y Saturno de 1563 estaba errada por un mes en las *Tablas alfonsíes* (lo que, dado que databan del siglo XIII, no era demasiado raro) y aún de varios días (lo que ya era más grave) en las *Tablas pruténicas*, compuestas pocos años

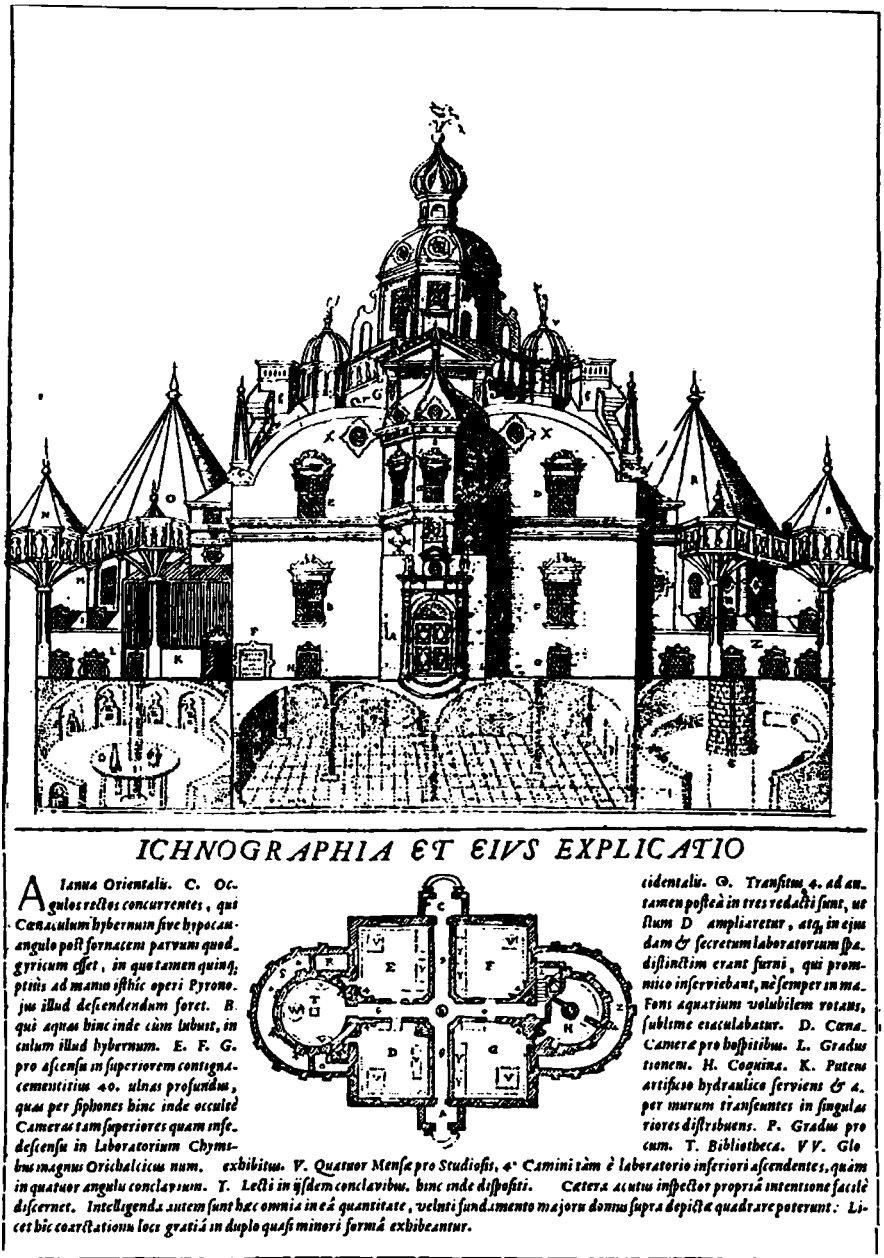


Figura 4.1. Observatorio de Tycho en la isla de Hven. De Tycho Brahe, *Astronomiae instauratae mechanica* (1598).

antes. En tal situación, no faltaron quienes se propusiesen mejorar el conjunto de observaciones disponibles. Pero esto no era sencillo. Se precisaba tanto de instrumentos difíciles de construir (y por lo tanto muy caros) como de la facilidad de poder dedicarse a la observación astronómica durante largos y continuados períodos de tiempo. En la segunda mitad del siglo XVI, abordaron esta tarea el Landgrave de Hesse, en su observatorio de Cassel y, de forma mucho más relevante, Tycho Brahe, en su observatorio de Uraniborg, en la isla de Hven.

Tycho se encontraba en una posición social y económica excepcional que le permitió instalar, no ya un observatorio, sino lo que hoy se considera como un verdadero centro de investigación. Contaba con edificios especialmente construidos, asistentes, e incluso recursos para fabricar papel y una imprenta para dar salida a sus publicaciones. A estos recursos, por su parte, se unía un especial genio para el diseño y manejo de instrumentos astronómicos. Sin entrar en más detalles, baste con decir que, si la precisión en el acervo de observaciones disponibles, con raras excepciones, rondaba los 10 o aún los 15 minutos de arco, Tycho fue capaz de alcanzar el minuto.

Junto a este esfuerzo por llevar las observaciones realizadas a simple vista a su máximo grado de precisión, Tycho destaca por sus actividades cosmológicas. Estas arrancan de fines de 1572. En este momento acaeció en los cielos un suceso espectacular y entonces sin precedentes conocidos: la aparición en la constelación de Casiopea de una nueva estrella (hoy clasificada como supernova), más brillante que cualquier otra del firmamento.

La cosmología aristotélica entonces aceptada establecía la total inmutabilidad de los orbes celestes: dentro de ese esquema, no podía tratarse de una estrella; tenía que tratarse de un fenómeno de índole meteorológica (así se clasificaban también los cometas) acaecido por debajo de la esfera de la Luna. Y, en tal caso, se debía poder medir su paralaje para obtener su distancia.

Esta determinación fue emprendida por diversos astrónomos, entre ellos Tycho. Aunque algunos que se dejaron llevar por sus preconcepciones y los errores de sus instrumentos manifestaron haber encontrado una paralaje importante, el resultado general fue que tal paralaje era indetectable: la nueva estrella se encontraba más allá de la Luna. De hecho, debía ser realmente una nueva estrella, puesto que tampoco pudo detectarse en ella ningún movimiento de tipo planetario. Tycho dejó esto bien sentado en su *De nova stella*, publicada al año siguiente. Así, comenzaron a surgir serias dudas sobre la veracidad de la cosmología aristotélica.

Cinco años más tarde de la aparición de la estrella, otro suceso astronómico vino a socavar todavía más profundamente la fe en la cosmología aristotélica: un nuevo cometa, de magnitud bastante espectacular. Como en el caso de la nova, se buscó su paralaje para determinar la distancia; lo que se halló es que, en todo caso, el cometa se hallaba en el mundo supralunar.

Algunos pensaron entonces que debían adscribirse a los cometas nuevas esferas cristalinas en los orbes celestes. Otros pusieron en tela de juicio la realidad de tales esferas. Tycho, en concreto, dejó de creer en su existencia al observar que el cometa debía haber atravesado en su movimiento las esferas

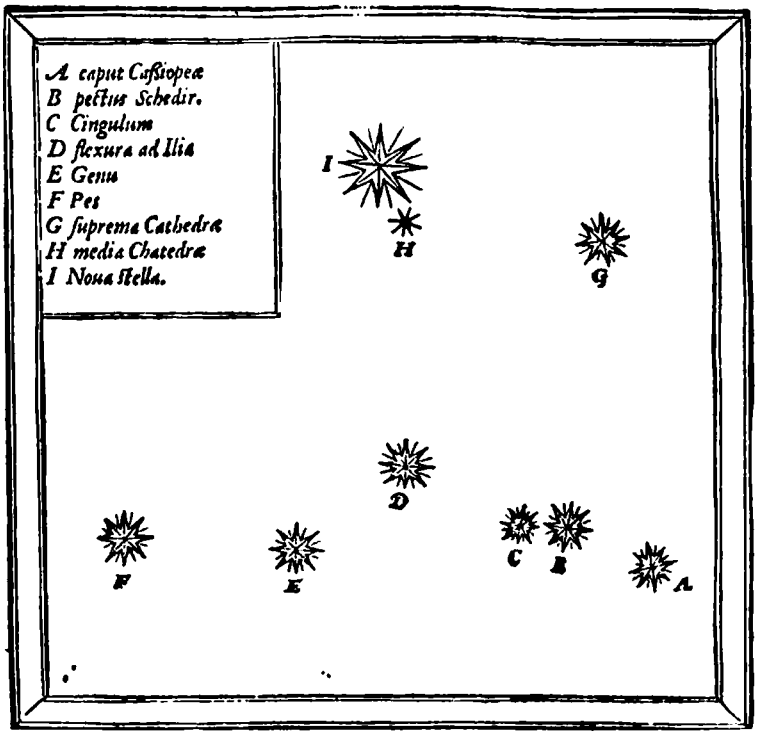


Figura 4.2. Estrellas de la constelación de Casiopea con la nova de 1572 de Tycho Brahe. *De stella nova* (1573).

de Venus y de Mercurio. Los cometas de 1580 y de 1585 no hicieron más que reforzar estas creencias.

Por entonces la astronomía ptolemaica se enfrentaba a la copernicana. Ambas no pasaban, sin embargo, de ser consideradas con un carácter meramente instrumental, pues nadie podía creer seriamente en el movimiento de la Tierra. En el plano cosmológico, la tradición aristotélica se tambaleaba. El momento era propicio para buscar un nuevo sistema que resolviese las dificultades. Y Tycho encontró un compromiso altamente satisfactorio, porque las eliminaba todas.

Su sistema era sencillo, y observacionalmente equivalente a los de Ptolomeo y Copérnico. Tycho seguía al primero dejando a la Tierra en reposo en el centro del universo; el movimiento diurno se atribuía, como siempre, a las

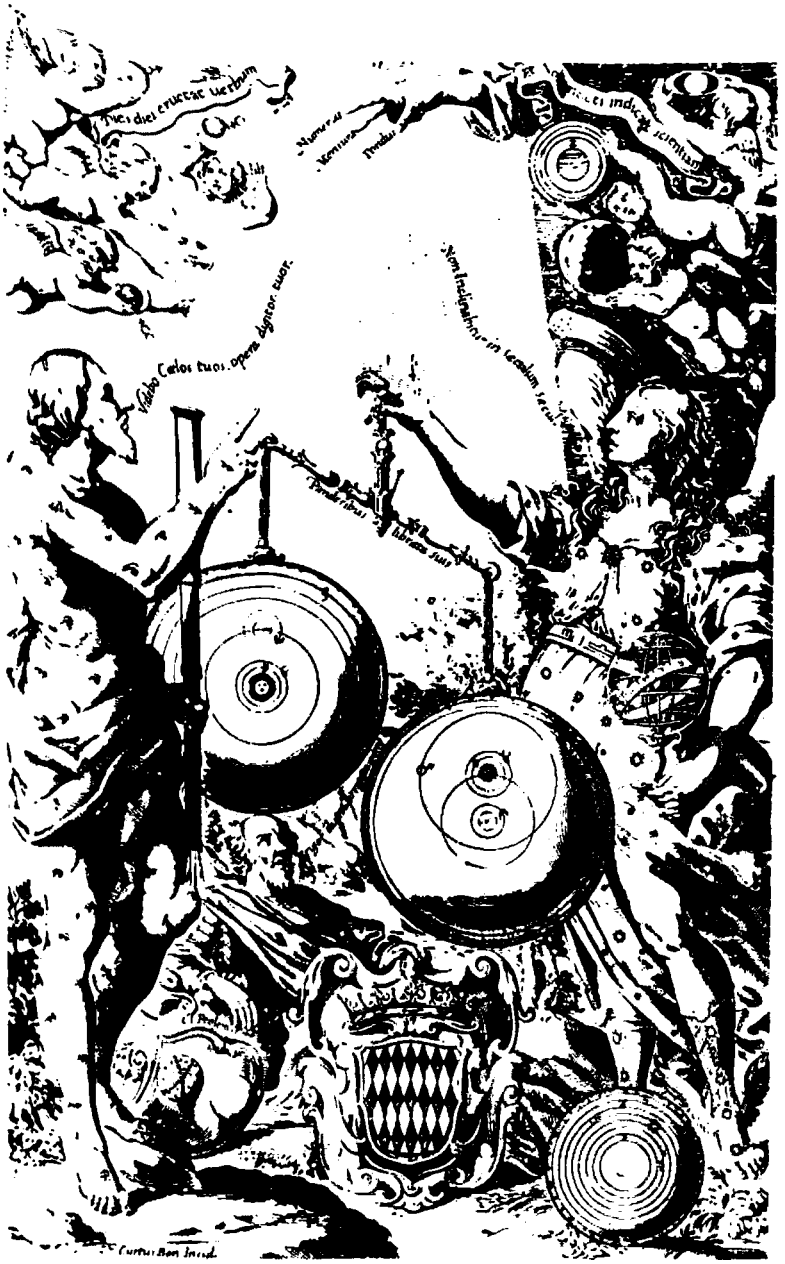


Figura 4.3. Frontispicio del *Almagestum novum* (1651) de Giovanni Battista Riccioli. En él se muestra a Urania pesando el sistema de Copérnico frente al de Riccioli, un sistema tychónico modificado en el que Mercurio, Venus y Marte giran en torno al Sol, y este, junto con la Luna, Júpiter y Saturno, giran en torno a la Tierra. Como es natural, la balanza se inclina por este último sistema. El de Ptolomeo, desechado, se halla a sus pies.

estrellas fijas. La Luna y el Sol giraban en torno a la Tierra. Y entonces adoptaba las ideas de Copérnico relativas a los planetas, haciéndolos girar en torno al Sol. De este modo se rechazaba la cosmología aristotélica, pero se conservaba el principio geostático. Y así el sistema podía dar respuestas instrumentales y constituir a la vez una imagen realista del cosmos. Esta propuesta se publicó en 1588, en una obra relativa al cometa del año anterior.

Si el sistema copernicano había tenido bien pocos seguidores, y aún no demasiado convencidos, el sistema geoheliocéntrico de Tycho alcanzó una gran resonancia. Más tarde se modificó dejando en reposo a las estrellas fijas y admitiendo el movimiento diurno de la Tierra, un sistema denominado semi-tychónico. En realidad, fueron éstos, más que el de Copérnico, los verdaderos sucesores del sistema de Ptolomeo.

4.3. Kepler, o la mística del cosmos

Entre los seguidores convencidos de Copérnico se encontraba Michael Mästlin, con quien se formara Johannes Kepler, el copernicano más ferviente cuya obra, como se apuntó en el Capítulo anterior, acabó con el copernicanismo. A él se debe, en realidad, el sistema que todavía hoy en muchos casos se atribuye erróneamente a Copérnico.

Kepler pensaba que la armonía y racionalidad del sistema copernicano reflejaba fielmente la constitución real del cosmos. Platónico convencido y ferviente cristiano, creía en un Dios geómetra que había configurado el universo como una suerte de símbolo de su propia naturaleza. La disposición del Sol, el espacio planetario y las estrellas (los elementos estáticos del sistema) era para él un símbolo de la Trinidad: el Padre, el Espíritu y el Hijo, respectivamente. De ahí su interés por desvelar la estructura geométrica del cosmos y el hecho de que, como se verá, el Sol asuma una posición muy especialmente privilegiada.

Con Kepler asistimos a la síntesis entre astronomía y cosmología, al nacimiento de la dinámica celeste. Por vez primera, las herramientas de las matemáticas no se ocupan de los planetas como meros puntos geométricos luminosos, sino como entidades plenamente materiales, de la misma naturaleza que la Tierra, sometidas a fuerzas físicas. El camino fue largo y dominado por el misticismo; este misticismo, sin embargo, nunca dejó de permanecer fiel a los datos de la observación. Pues se trataba de encontrar una hipótesis sobre el universo tan verdadera como esos mismos datos.

4.3.1. El misterio del universo

La propuesta copernicana mostraba por primera vez un sistema ordenado, en el que se podían calcular las dimensiones de los orbes planetarios.

Yendo más allá, Kepler se preguntó por el esquema geométrico subyacente a este orden, el por qué de la existencia de precisamente seis planetas, de sus determinadas distancias al centro, que los separan ampliamente entre sí, y de sus movimientos.

La respuesta la encontrará en la existencia de los cinco sólidos o poliedros regulares platónicos. En el plano pueden trazarse tantos polígonos regulares como se quiera; pero en el espacio el número de sólidos regulares, cuerpos simétricos cuyas caras son polígonos regulares que encajan perfectamente entre sí, sólo existen cinco, que se muestran en la figura 4.4. Cada uno de estos cuerpos admite una esfera inscrita, tangente al centro de todos y cada uno de los polígonos que los forman, y una esfera circunscrita, concéntrica con la anterior y tangente a sus vértices. Según la doctrina platónica, existía una estrecha correspondencia entre los cinco elementos y estos sólidos perfectos.

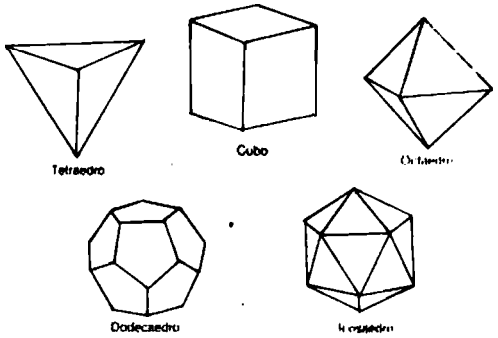


Figura 4.4. Los cinco sólidos regulares.

Planeta	Sólido regular	Valor Calculado	Valor de Copérnico
Saturno			
Júpiter	Cubo	577	635
Marte	Tetraedro	333	333
Tierra	Dodecaedro	795	757
Venus	Icosaedro	795	794
Mercurio	Octaedro	707	723

Tabla 1. Los valores que aparecen en la columna «valor calculado» son los radios de las esferas inscritas en cada uno de los sólidos regulares, adoptando el valor de 1000 para las correspondientes esferas circunscritas. En la columna de la derecha se recogen los correspondientes valores deducidos de la obra de Copérnico. En el caso del octaedro debería haberse calculado el valor de 577; pero aquí Kepler ha utilizado, no la esfera inscrita en el octaedro, sino la que toca a sus bordes.

Kepler piensa que estos cuerpos también pueden dar cuenta de las disposiciones celestes. La idea es encajarlos unos en otros. Se inscribe un cubo en la superficie esférica inferior del orbe de Saturno; entonces la esfera inscrita en dicho cubo coincide con la esfera superior del orbe de Júpiter, que a su vez es la esfera circunscrita de un tetreadro cuya esfera inscrita es la esfera superior del orbe de Marte. El orbe inferior de Marte es a su vez una esfera que circunscribe un dodecaedro, y su esfera inscrita es la esfera superior del orbe de la Tierra. La superficie inferior del orbe de la Tierra circunscribe a un icosaedro, cuya esfera inscrita es la esfera superior del orbe de Venus. Y la esfera inferior del orbe de Venus circunscribe a un octaedro cuya esfera inscrita es la esfera superior del orbe de Mercurio. En la figura 4.5. se muestra esta disposición.

La idea puede parecer hoy un tanto disparatada, pero, si se consulta la Tabla siguiente, en donde la distancia media de la Tierra al centro del sistema se toma como unidad, se verá que los valores predichos por este

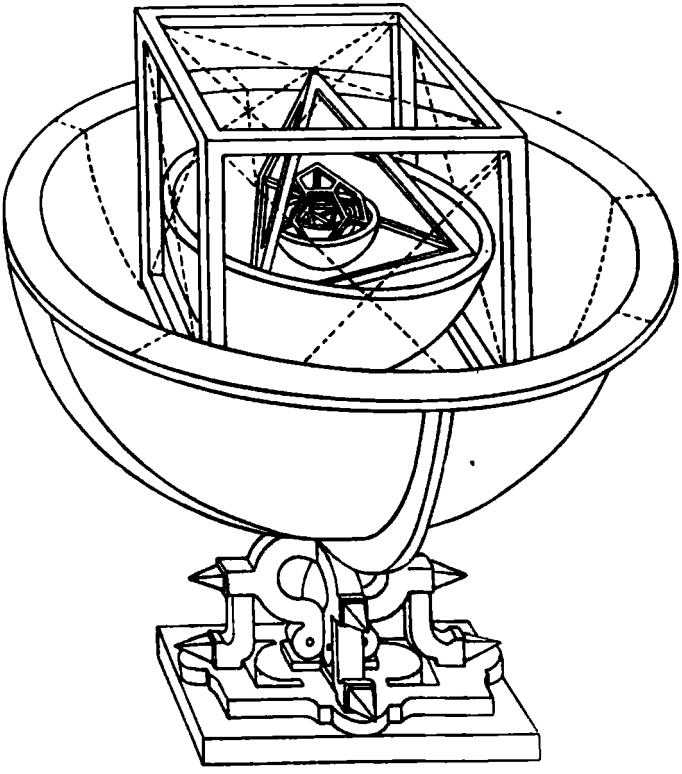


Figura 4.5. Disposición de los orbes celestes y los sólidos regulares. De Johannes Kepler, *Mysterium cosmographicum* (1596).

esquema para la distancia media de los orbes de los planetas así situados coincide más que notablemente con los valores de las distancias medias de los planetas al centro deducidos por Copérnico. Además, sólo existen cinco sólidos regulares, lo que explica por qué sólo pueden existir cinco espacios intermedios entre los orbes, y por consiguiente sólo seis planetas. Esta idea la mostrará en su *Misterium cosmographicum*, publicado en 1596 (y que alcanzará una segunda edición en 1621).

El acuerdo, sin embargo, no es perfecto, una circunstancia que se podía achacar a los datos de la observación. Tycho disponía, gracias a su labor, de mejores resultados para las excentricidades de los orbes planetarios de los que había podido utilizar Kepler. Este se convirtió en su ayudante y, a su muerte, en su sucesor. El esquema de Kepler le explicaba la razón del número de los planetas y del patrón de distancias. El trabajo que Tycho le encomendó, el de encajar en su sistema los recalcitrantes datos relativos a Marte, como veremos en seguida, le daría la razón de sus movimientos.

4.3.2. La guerra con Marte

Hasta Copérnico inclusive, toda la astronomía se había basado en dos principios que se consideraban indiscutibles: los únicos movimientos admisibles en los cielos debían ser circulares, y además estrictamente uniformes. De ahí que, como se vio en el Capitulo precedente, se multiplicaran las excéntricas y los epiciclos. Bien es verdad que la introducción del ecuante vulneraba la segunda condición, pues el movimiento resultaba uniforme respecto a este punto y no respecto al centro del círculo deferente; pero no dejaba de ser un artificio matemático sustituible (y así lo haría Copérnico) por un epiciclo apropiado.

En sus indagaciones sobre la órbita de Marte (lo que él llamó la guerra contra Marte), Kepler abandonó el principio de uniformidad de los movimientos, y se vio finalmente obligado a abandonar también el de circularidad. En este apartado trataremos de esbozar los puntos más destacados de este proceso.

Hasta Kepler, la astronomía había sido exclusivamente cinemática. No importaba la naturaleza de los puntos de luz que se veían en el firmamento: se trataba sólo de predecir sus movimientos. Kepler, sin embargo, otorgaba al Sol un especial protagonismo como fuente del movimiento cósmico. Por ello los planetas (incluída la Tierra) debían moverse más rápidamente cuanto más próximos estuviesen al Sol y, dentro de su órbita, más en el afelio que en el perihelio. Rechazaba así por razones de índole física la supuesta uniformidad de los movimientos planetarios.

Estas ideas le llevaron a modificar en dos puntos la teoría de Copérnico. En primer lugar, éste había situado el centro del sistema, no en el Sol, sino en el centro del deferente de la Tierra, posición que correspondería a la de

un ficticio «Sol medio» que, visto desde nuestro planeta, tuviese un movimiento desprovisto de irregularidades. De modo que el sistema copernicano, en contra de lo que vulgarmente se cree, no era *heliocéntrico*, sino *heliostático*. Kepler lo convertiría en heliocéntrico, estableciendo además que los planos de las órbitas de los planetas, que hasta el momento se consideraban variables, debían intersecarse, no en el centro de la órbita terrestre, sino en el mismo Sol. En tal caso su inclinación se mostraba constante (la de Marte, en concreto, resultaba de 1.º 50'). La segunda modificación de Kepler se refería a la órbita de la Tierra. Para describirla, Copérnico había utilizado sólo una excéntrica mientras que, en el caso de los demás planetas, había añadido un epiciclo para dar cuenta de la variación de la velocidad en sus órbitas. De modo que la Tierra se encontraba en un caso especial de movimiento uniforme. Considerándola un planeta más sometido a la influencia solar, Kepler usará un ecuante para introducir una diferencia de velocidad entre el afelio y el perihelio. Con esta nueva disposición encontró que podía dar cuenta igualmente bien del movimiento de nuestro planeta; sin embargo, la variación de su distancia media al Sol se reducía a la mitad.

Ahora bien, para estudiar el caso de Marte, Kepler debía utilizar un conjunto de observaciones realizadas desde la Tierra. En un sistema heliocéntrico, estas mediciones debían necesariamente trasladarse al Sol como referencia, y para ello debían conocerse bien todas las características del movimiento terrestre, incluida la distancia al Sol en cada momento. De modo que Kepler intentó obtener la variación de esta distancia mediante la medición, a lo largo de un año completo, de los diámetros aparentes del Sol. Esto le obligó a realizar importantes estudios en el campo de la óptica, pero le condujo a escasos resultados prácticos. De modo que atacó el problema desde otro ángulo.

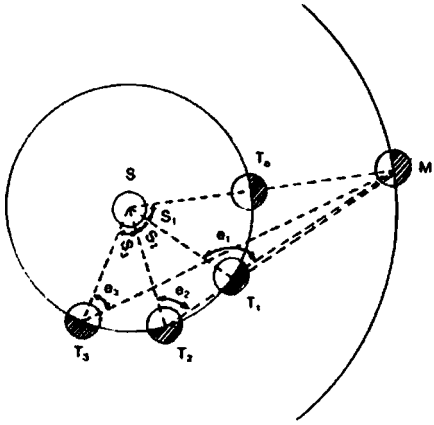


Figura 4.6.

Consideremos la figura 4.6. En ella se ven el Sol, la órbita de la Tierra, y la de Marte. El período sidéreo de Marte es, aproximadamente, de 687 días, al cabo de los cuales Marte ha descrito una revolución completa y se vuelve a encontrar en el mismo punto de su órbita. Consideremos el instante de la oposición, momento en el que Marte ocupa, respecto de la Tierra, situada en T_0, una posición diametralmente opuesta al Sol. Al cabo de 687 días, Marte volverá a

ocupar la misma posición M; la Tierra, sin embargo, tiene un período de 365,25 días, por lo que no habrá llegado a describir dos revoluciones completas en este intervalo, encontrándose en T_1. Transcurridos otros 687 días, estará en T_2, luego en T_3, etc. Se forman así una serie de triángulos SMT_1, SMT_2, SMT_3, etc. Lo que Kepler desea conocer son las distancias de la Tierra al Sol ST_0, ST_1, ST_2, etc. Los ángulos s_1, s_2, etc., representan distintas posiciones del Sol sobre la eclíptica, cada 687 días, y este movimiento solar aparente era bien conocido; los ángulos e_1, e_2, etc., se conocen también gracias a las observaciones de Marte realizadas en las distintas oposiciones del planeta. Si, finalmente, tomamos la distancia SM como unidad, podremos, resolviendo los triángulos, conocer las distancias de la Tierra al Sol SE_1, SE_2, etc., en términos de SM.

Gracias a esto Kepler encontró que la órbita terrestre era un círculo con el Sol ligeramente desplazado del centro, y que sobre tal círculo el movimiento de la Tierra no era uniforme.

Reducidas al Sol las observaciones de Marte, Kepler ensaya un modelo de excéntrica con ecuante, representado en la figura 4.7. En él C es el centro del deferente, AB la línea de ápsides (que une el afelio con el perihelio), S es el Sol, y E el ecuante. Las excentricidades e_1 y e_2, respectivamente, son las distancias del Sol y del ecuante al centro C. El problema de la órbita marciana se resolverá determinando la posición de la línea de ápsides en un momento dado, y ambas excentricidades. Pero ello era algo que sólo podía hacerse por tanteo, y los cálculos, en cuya descripción no entraremos, fueron difíciles, largos y tediosos. (El borrador de Kepler, que se conserva hoy, consta de 900 folios escritos con letra pequeña).

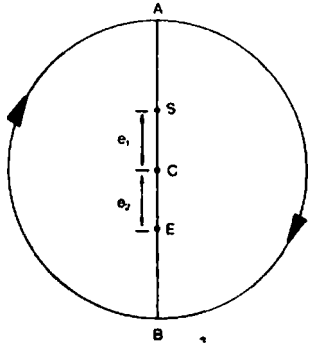


Figura 4.7.

Finalmente, Kepler llega a encajar sus datos en el modelo con una precisión de 2 minutos de arco para las longitudes heliocéntricas. Pero, sin embargo, las latitudes se desviaban hasta 8 minutos de arco, un error que no podía adjudicarse a los precisos datos obtenidos por Tycho. A este modelo, que a cualquier astrónomo del momento hubiese resultado satisfactorio, lo denominó su «hipótesis vicaria», pues sólo resultaba ser una aproximación a la solución que buscaba. Kepler podía introducir en su modelo un artificio matemático para salvar las apariencias; pero ése no era su objetivo: estaba firmemente convencido de que la geometría del modelo debía reflejar fielmente la realidad física.

Otro menos cabezota lo hubiese dejado correr, pero Kepler volvió a

empezar desde el principio. Hemos visto que, en su modelo de excéntrica con ecuante representado en la figura 4.7. había dejado indeterminadas las dos excentricidades e_1 y e_2; Ptolomeo, por su parte, las había considerado iguales, algo que el mismo Kepler había aplicado a la Tierra. Por otra parte, seguía convencido del origen solar del movimiento planetario. Pensaba que el influjo solar (sobre la naturaleza de la fuerza solar se hablará un poco más adelante), debía disminuir proporcionalmente a la distancia.

Kepler se puso a trabajar en esta última idea. En el caso de la Tierra, la proporcionalidad se cumplía bien en el afelio y en el perihelio. Ahora debía ver si sucedía lo mismo en los restantes puntos de la órbita. El tiempo que emplease la Tierra en recorrer una pequeña porción de la órbita (tan pequeña como para que su distancia al Sol pudiese considerarse constante mientras la recorría) debía ser inversamente proporcional al impulso recibido del Sol, es decir, inversamente proporcional a la distancia. De modo que el intervalo de tiempo que el planeta invertía en recorrer una porción determinada de su órbita (suma de todos los pequeños intervalos de tiempo anteriores) dependería de la suma de las distancias correspondientes. Kepler asimiló (no muy correctamente) esta última suma a un área. De ahí surgió una ley conocida hoy como la segunda ley de Kepler o «ley de las áreas»: la línea que une al Sol con el planeta barre áreas iguales en tiempos iguales (véase la figura 4.8.).

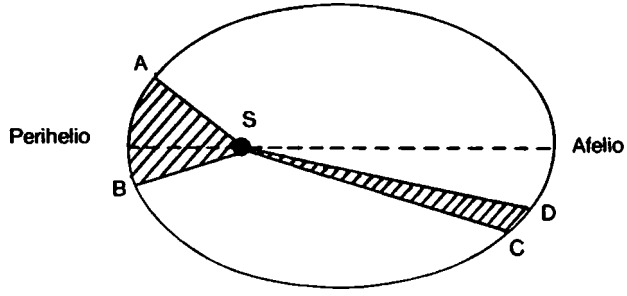


Figura 4.8. Ley de las áreas. Si las dos áreas sombreadas son iguales, el planeta recorrerá los arcos AB y CD en el mismo tiempo. De modo que en el perihelio se moverá más rápido que en el afelio.

Habiendo constatado que la Tierra cumplía bien esta ley, Kepler retornó al problema de Marte. Pero cuando aplicó la ley de las áreas a este planeta, encontró que no se cumplía: iba demasiado rápido en los ápsides y demasiado lento en los puntos intermedios (cuadrantes). En este punto, el lector comenzará a entrever que, si se ha de mantener la ley de las áreas, la órbita ya no puede ser circular: debería poseer más área en torno a los ápsides, o menos en las posiciones intermedias, o ambas cosas a la vez.

Kepler también comenzaba a entreverlo, por más que durante un tiempo estuviese dispuesto a abandonar su ley de las áreas en favor de la tradicional circularidad de la órbita. Pero un último e infructuoso intento de encajar las posiciones marcianas en un círculo le acabó de convencer. Kepler renuncia aquí al otro principio básico que había guiado toda la indagación astronómica. Así, vuelve al viejo método y comienza a jugar con un epiciclo, buscando la curva resultante; lo que resulta es un ovoide, es decir, una figura en forma de huevo, con la parte más achatada dirigida hacia el Sol (Fig. 4.9). Falto de teoría geométrica que le permita tratar con él, Kepler se sumergió en un mar de cálculos y de confusión. A pesar de todo, las cosas no cuadraban.

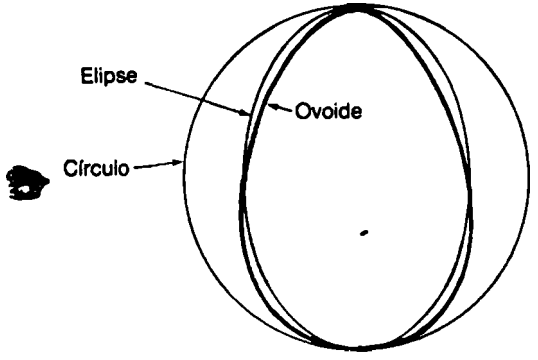


Figura 4.9.

Ahorraremos al lector los detalles que siguen. Kepler siguió probando y probando, y en el transcurso de las pruebas llegó a dar con una regla que señalaba la diferencia sistemática que había entre el círculo y la trayectoria que estaba buscando: esta regla indicaba que se trataba de una elipse. Pero Kepler no lo vio (las matemáticas de entonces no eran las de hoy), y la abandonó para ensayar precisamente una trayectoria elíptica. (De hecho, había venido utilizando la figura elíptica como una herramienta auxiliar que aproximaba la curva que estaba buscando; pero no le otorgó sentido físico real, pues la elipse tenía dos focos, mientras que Kepler buscaba una curva con un solo foco, situado en el Sol). Por fin se convenció: la órbita consistía en una elipse, muy próxima (como las restantes del Sistema Solar) a una circunferencia, con el Sol en uno de sus focos. Y esto, como pudo constatar, era válido para todos los planetas. La ley se conoce hoy como la primera ley de Kepler.

Toda la investigación de Kepler sobre la órbita marciana fue final y prolijamente recogida, punto por punto, en su *Astronomia nova*, publicada en 1609. El trabajo había finalizado en 1605 y Kepler había invertido en él cinco años.

4.3.3. La música de las esferas

La búsqueda del arquetipo geométrico del cosmos por parte de Kepler se extendía más allá del dominio de la astronomía: prentendía encontrar el esquema de la totalidad de la creación. En su *Harmonice mundi*, finalizado en 1618 y publicado al año siguiente, retomaba el esquema de su *Misterium cosmographicum* y trataba la idea de la existencia de una armonía matemática universal que se extendía desde la geometría a la música y de ésta a la astrología y a la astronomía.

Esta armonía consistía para Kepler en ciertas proporciones. Los pitagóricos las habían establecido aritméticamente, a partir de las divisiones de una cuerda vibrante, para la teoría musical. Kepler piensa que su origen no es aritmético, sino geométrico, y trata de deducirlas a partir de las divisiones engendradas en una circunferencia en la que se inscriben los distintos polígonos regulares. La cuestión es complicada, y no insistiremos en ella.

La parte astronómica de la obra, el Libro V, muestra cómo las armonías y consonancias musicales se extienden a los orbes planetarios. Kepler intentó encontrar estas proporciones armónicas en la sucesión de tamaños de los planetas, en sus períodos, en sus velocidades extremas, en las variaciones de su velocidad,... Las cifras no fueron significativas hasta que adoptó al Sol como punto de referencia de los movimientos y constató que las velocidades angulares (los arcos recorridos en la unidad de tiempo) de cada planeta en el afelio y en el perihelio guardaban una proporción de este tipo. Esto resultaba cumplirse no sólo para cada planeta, sino también para cada par de planetas. Tomando las proporciones de las sucesivas velocidades de todos los planetas como intervalos musicales, aparece una composición musical a seis voces.

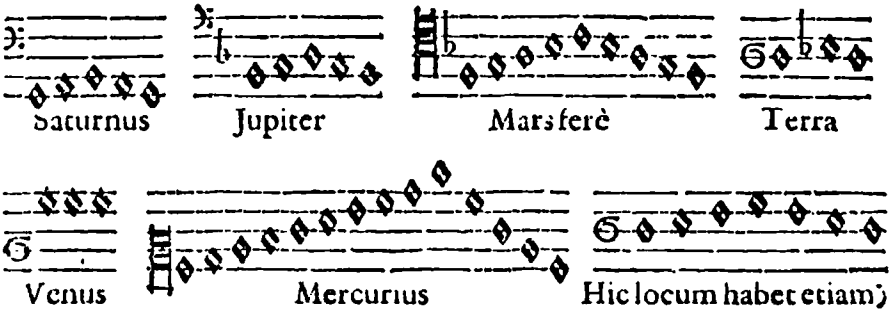


Figura 4.10. La música de los planetas de Kepler, de su *Harmonice mundi* (1619).

El descubrimiento de esta «sinfonía de los planetas» constituye el cuerpo principal del Libro V del *Harmonice*. Sin embargo, poco antes de su impresión, jugando con los números, Kepler encontró otra ley cuya plena

importancia sólo se revelaría más adelante. Halló que la proporción entre los períodos de revolución de dos planetas cualesquiera es la de sus distancias medias al Sol elevada al exponente 3/2. O, dicho en otros términos, que para cada planeta el cuadrado de su período es proporcional al cubo de su distancia media. Se la conoce como tercera ley de Kepler.

4.3.4. La fuerza solar

Siendo la velocidad de cada planeta inversamente proporcional a su distancia al Sol, a Kepler le resultaba evidente que la causa del movimiento de los planetas debía residir en el Sol mismo, y debilitarse con la distancia al centro.

Esta idea tenía consecuencias muy notables. Llevaba a rechazar toda la distinción aristotélica entre física celeste y terrestre basada en los lugares naturales; todos los lugares del espacio interplanetario kepleriano son así idénticos. Además, demandaba la introducción de un concepto nuevo, el de inercia, que redefinido más adelante mostraría su trascendental importancia. En efecto, rotos por Tycho los orbes sólidos de la cosmología aristotélica, ¿qué era lo que mantenía en su lugar a los planetas? Kepler piensa que se trata de una inercia, de una tendencia natural al reposo (y en este sentido el concepto está ligado a la física aristotélica), de una impotencia de moverse a sí mismo, que será tanto mayor cuanto mayor sea la magnitud o «voluminosidad» del cuerpo (no cabe hablar aquí todavía de su masa) y que se opondrá constantemente a la acción de toda fuerza que lo mueva. Así, la velocidad de un cuerpo resultará de la proporción entre la fuerza motriz y su inercia.

Kepler encontró en el magnetismo una de las claves de la naturaleza de las fuerzas motrices que actúan en el Sistema Solar. En 1600, William Gilbert publicaba una obra que ejerció gran influencia, su *De magnete*. En ella estudiaba las propiedades magnéticas (teñidas de un fuerte matiz animista) y mostraba que la Tierra se comportaba como un gran imán. En concreto, pensaba que el carácter circular de la acción magnética daba cuenta del movimiento de rotación de nuestro planeta.

En su *Astronomia nova*, Kepler aceptó acciones inmateriales de naturaleza similar a la luz como causa del movimiento orbital de los planetas: el Sol emite una «species motrix», una virtud motriz, que se extiende a los orbes planetarios haciéndolos girar —como por otra parte al mismo Sol— en círculos, con una velocidad angular inversamente proporcional a su distancia. Puede visualizarse esto considerando a la species como los radios de una rueda que, al girar con el cuerpo del Sol, arrastran tangencialmente a los planetas; cuanto más cerca del Sol está el planeta, mayor es la fuerza de esos rayos y, por consiguiente, mayor es su velocidad. Pero este movimiento es estrictamente circular y uniforme, y hay que superponerle el efecto de la

excentricidad para dar cuenta de las variaciones en la velocidad orbital. Para ello supone que el Sol es como un gran imán, con uno de sus polos en el centro y el otro en su superficie, y que cada planeta posee un eje magnético, que Kepler hace de dirección fija en el espacio: siendo sus polos de signos opuestos, el planeta será atraído por el Sol durante la mitad de su trayecto y repelido durante la otra mitad, según cuál sea el signo del polo más próximo. La inclinación de las órbitas se explica por la adición en cada planeta de un nuevo eje magnético.

Más tarde, en su *Epitome astronomiae copernicanae* (1618-1621), Kepler modificará este esquema. Ahora atribuirá los movimientos de rotación de la Tierra y el Sol a la presencia de sendas facultades o «espíritus motrices» encargados de renovar constantemente un impetus inicial impreso por Dios. El movimiento orbital se sigue atribuyendo a una species motrix que emana del Sol; pero ahora Kepler elimina las fuerzas magnéticas que dan cuenta de la excentricidad, pues éstas se ejercen entre el planeta y el Sol, es decir, son mutuas, y por consiguiente podrían mover a éste. Así, establece una acción unilateral, admitiendo que la fuerza solar es de una naturaleza cuasi-magnética tal que, teniendo los planetas una parte «amiga» y otra «enemiga», los atrae o repele según una u otra parte esté vuelta hacia el Sol. Kepler sigue explicando este mecanismo mediante la analogía con los fenómenos magnéticos, si bien de una manera obscura; no entraremos en detalles.

4.4. Galileo y la astronomia telescópica

Como se ha mencionado anteriormente, los sistemas ptolemaico, copernicano y tychónico, pese a conducir a trayectorias distintas para los planetas, resultaban en todo observacionalmente equivalentes. La paralaje de las estrellas fijas, única prueba con la que se podía distinguir el sistema de Copérnico, no se había observado; pero esto, en todo caso, sólo indicaba que las estrellas se hallaban más alejadas de lo que se creía y que los instrumentos astronómicos de la época no alcanzaban a discernirla. Tal era la situación cuando el telescopio irrumpió en la escena.

Las circunstancias concretas del descubrimiento del catalejo (sólo más tarde se le bautizaría como telescopio) no se saben con detalle. Su papel en la astronomía, sin embargo, es mejor conocido, y generalmente se fecha su introducción en 1609, cuando Galileo lo apuntó a los cielos. Si bien no fue el primero en hacerlo; poco antes, Thomas Harriot había observado la Luna. De cualquier modo, Galileo fue el primero en usarlo sistemáticamente para indagar el firmamento.

Galileo examinó la Luna en el otoño de 1609, con un catalejo de su propia construcción, que alcanzaba unos veinte aumentos. La apariencia de

nuestro satélite siempre había constituído una incógnita. La tradicional perfección de los orbes celestes exigía que tanto la Luna como los demás planetas fuesen lisos y esféricos, como dotados de una naturaleza distinta a la terrestre. Las manchas que, sin embargo, presenta a simple vista fueron explicadas ad hoc mediante ideas tales como la existencia de regiones de diferente densidad. En principio, el catalejo no tenía por qué cambiar las cosas. Contra lo que se afirma en ocasiones, Galileo no vio montañas en la Luna; lo que vio fue una distribución cambiante de luces y sombras. Que interpretase tal distribución como muestra de un relieve análogo al terrestre es un exponente de sus convicciones, si no copernicanas, si cuanto menos antiaristotélicas, al hallarse predispuesto a otorgar a la Luna la misma naturaleza terrestre. No en vano dedicó varias páginas de su *Sidereus Nuncius* (1610), en donde da cuenta de sus descubrimientos telescópicos, para llevar de la mano al lector desde este patrón de manchas a la existencia de verdaderas montañas y valles. Las sombras y luces cambiantes se explican como el resultado de la iluminación solar; es lo mismo que sucede con las sombras que arrojan las montañas a la salida del Sol, al principio muy largas y encogiendo a medida que el Sol asciende en el cielo.

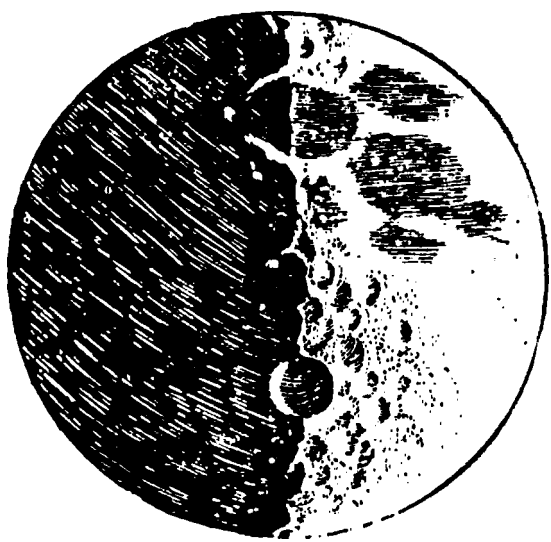


Figura 4.11. Dibujo de la Luna por Galileo.

Tras la Luna, Galileo dirigió su atención a los planetas. Estos, a diferencia de las fijas, que aun a través del telescopio se seguían apreciando como puntos luminosos, se veían como discos, una prueba de su relativa proximidad en relación con las estrellas y una justificación para la ausencia de

paralaje detectable en éstas. A principios de 1610 observó a Júpiter, y halló próximas a él tres pequeñas y brillantes estrellas. Tres *estrellas.* La observación durante las noches subsiguientes le mostró en ocasiones tan sólo dos de ellas, y también que su posición cambiaba de un lado a otro del planeta, sin que se separasen de él. Su interpretación de estas estrellas, cuyo número terminó cifrando en cuatro, como lunas o satélites de Júpiter, necesitó de una cierta dosis de copernicanismo. Galileo había encontrado en Júpiter y sus satélites una suerte de justificación al giro de la Luna en torno a la Tierra, a la vez que una analogía del Sol con sus planetas girando alrededor.

Otro importante hecho de los cielos lo halló observando a Venus. Encontró que, al igual que la Luna, este planeta presentaba fases a lo largo de una revolución completa. Se trataba entonces de un cuerpo opaco que, como la Tierra o la Luna, reflejaba la luz del Sol. Todavía más, como en el disco del planeta se apreciaban plenamente las fases «nueva» y «llena», resultaba claro que debía girar en torno al Sol, contrariamente a lo afirmado por el sistema ptolemaico. Cuando dirigió su anteojo a las estrellas, éstas se

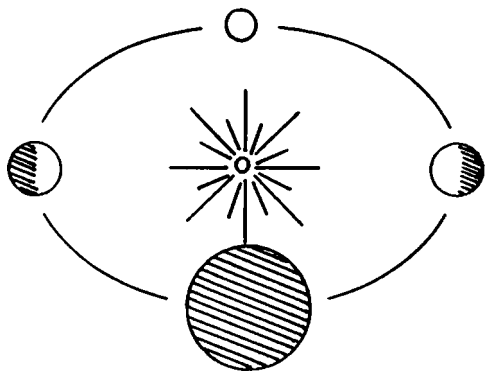


Figura 4.12. Fases de Venus.

multiplicaron. Aparecieron por todas partes nuevas estrellas que antes nunca habían podido contemplarse. La misma nebulosidad de la Vía Láctea se resolvió en un conglomerado de brillantes puntos de luz.

Otro aspecto novedoso en los cielos o constituyó la observación de las manchas solares. En 1610 Thomas Harriot efectuó la primera observación telescópica del Sol, y a partir de esta fecha algunos astrónomos, entre ellos Galileo, comenzaron a hacer observaciones regulares. Lo que se pudo apreciar es la existencia de distintas manchas de aspecto cambiante, dotadas además de un movimiento que se atribuyó a la existencia de una rotación solar. El Sol, pues, no sólo no era tampoco tan perfecto como lo quería la tradición aristotélica, sino que tenía además un movimiento de giro, el cual

ya fuera postulado por Kepler como necesario para que la species motrix hiciese circular los planetas.

Es difícil exagerar el asombro y entusiasmo que provocó en Galileo este atisbo de un nuevo cosmos, antes nunca contemplado, del que salieron reforzadas sus convicciones copernicanas. Tampoco el de Kepler (por otra parte, ya sobradamente convencido), quien publicó diversas obras defendiendo los nuevos datos como prueba de su propia interpretación del sistema de Copérnico. Al difundirse rápidamente el nuevo instrumento y confirmarse sus observaciones, la fama de Galileo se extendió. Todos estuvieron de acuerdo en la gran importancia de los nuevos descubrimientos; pero el consenso iba a ser bastante menos unánime respecto de su interpretación, por lo demás igualmente buena en el sistema tychónico. Como veremos en el Capítulo siguiente, si Kepler pudo ser a la vez copernicano y hereje, a Galileo le iba a resultar imposible ser copernicano y católico.

5.

Una nueva física para un nuevo cosmos

Recordando la marcha de los dos últimos capítulos, se reparará en que el copernicanismo se caracterizó por una tendencia a unificar aspectos diversos de la ciencia. En el estricto dominio de las matemáticas, la astronomía técnica había tendido a poner entre paréntesis sus propios fundamentos cosmológicos en aras de la conveniencia, mientras que Copérnico hizo ver que sólo la verdad (cosmológica) es útil para dar con modelos que generen apariencias verdaderas. Con todo, la primera generación de astrónomos bajo el copernicanismo (los que andaban ya por los treinta o más al publicarse el *De revolutionibus*, como Frisius, Osiander, Reinhold, Retico o Apiano) no aceptaron esta filosofía copernicana, por más que a veces adoptasen la astronomía técnica de Copérnico por conveniencia computacional.

Otra segunda unificación copernicana de matemáticas y física fue aún más profunda. Se recordará que las ciencias matemáticas y las físicas estaban separadas desde que Aristóteles reconociese que la filosofía natural se ocupa de un objeto, la naturaleza, cuya esencia es el cambio. El mundo de los objetos matemáticos, inmutables, necesarios y eternos, mal podía avenirse a dar cuenta de lo continuamente mudable, generable y corruptible. Hasta tal punto las matemáticas y la física estaban separadas, que la reforma copernicana no despertó prácticamente ninguna reacción inmediata entre los filósofos naturales. Sólo los fundadores de algunas herejías modernas, como Lutero en 1539, Melachthon en 1549 y Calvino después, madrugaron para atacar al buen canónigo polaco, mientras que el Papa católico tardó más de setenta años en desmelenarse. Ello prueba que, aunque con la debida moderación cualquier religión pueda ser buena, dejadas a sí mismas son un incordio.

La segunda generación copernicana, las personas nacidas a la par que el *De revolutionibus* (como Bruno, Tycho Brahe, T. Digges o M. Mästlin), creció acostumbrada a considerar el movimiento terrestre en un plano matemático y cosmológico. Entre estos, casi todos eran copernicanos filosóficos, esto es en espíritu si no a la letra. La aceptación o no del movimiento terrestre era secundaria respecto a la creciente evidencia frente a Aristóteles de que la estructura del cosmos era realmente matemática. Los criados entre las armonías copernicanas sustentaban la idea neoplatónica de que las matemáticas de los astrónomos revelaban la estructura de la creación debida a un dios geómetra. Con todo, una cosa es el cosmos de las esferas y los planetas divinos y otra, muy otra, la física de este suelo.

El problema del movimiento terrestre, aparte su inobservabilidad, era el de combinar los movimientos violentos y naturales de la experiencia cotidiana con la participación en el movimiento general de fondo, el natural circular de la Tierra. Geométricamente no era difícil combinar movimientos y Aristóteles sabía cómo hacerlo; pero físicamente los diversos tipos poseían funciones incompatibles ontológicamente, por lo que si antes no se rompían las categorías aristotélicas, el movimiento terrestre era absurdo. Por ejemplo, ontológicamente los movimientos *naturales* sirven para mantener el orden y los *violentos*, para alterarlo. Por ende un objeto no puede tener ambas finalidades contradictorias a la vez. Lo mismo ocurre con los naturales *circulares* que conservan el orden y los *rectilíneos* que lo restauran. No tiene sentido hacer las dos cosas a la vez, pues si no hay orden, primero se restaura y luego se conserva: por eso una piedra que cae no puede tener a la vez un movimiento rectilíneo de caída y uno circular junto con la Tierra, por lo que si ésta se mueve (casi medio kilómetro por segundo en el ecuador), la piedra se retrasará hacia Occidente.

Exceptuando quizá a Bruno, nadie se sacudió el aristotelismo lo suficiente para emprender una defensa coherente del movimiento de la Tierra. Los intentos de Copérnico o de Digges (1576) de justificar la aparente ausencia de efectos del movimiento terrestre no estaban bien fundados. Digges, por ejemplo, justificaba el descenso vertical sin retraso hacia Occidente señalando que, después del reposo, el movimiento circular propio de los todos es lo más perfecto, con lo que el movimiento rectilíneo de una parte (el grave) se puede unir al circular del todo. Ahora bien, una parte no es un todo y no se ve cómo le conviene el movimiento circular perfecto a lo que necesita recuperar la perfección en su lugar propio. La combinación libre y sin trabas de diferentes tipos de movimiento exigía previamente su desontologización y su conversión en una magnitud puramente espacial, neutra cosmológicamente.

Tycho Brahe geometrizó el problema desde los presupuestos del sentido común aristotélico, inventando un argumento moderno cuya refutación habría de ser previa a cualquier aceptación científica de la doctrina coperni-

cana. Brahe tenía muchos motivos para descreer en el movimiento de la Tierra, entre ellos el de ser un buen cristiano. Como todo el mundo sabe, Josué mandó detenerse al Sol y no a la Tierra. Además, como a Pascal, a quien asustaba la frialdad de los inmensos espacios vacíos, sentía vértigo ante la enorme distancia que había que crear entre Saturno y las estrellas para que éstas no presentasen paralaje. Pero todo ello se plasmaba luego en argumentos físicos. Uno de ellos era el ya mentado retraso de los graves hacia occidente. Otro, el vuelo de las aves. Con una velocidad ecuatorial de 1670 km / h, o unos 460 m / seg para más dramatismo, la Tierra debiera ser un duro hogar para las tiernas avecillas. Un ligero aleteo hacia el Oeste les bastaría para desplazarse a casi medio kilómetro por segundo respecto a los trigales, mientras que el más rudo de los aleteos en dirección oriental no podría superar a una Tierra que huye hacia el Este a semejante velocidad. Lo mismo cabe decir de nubes y vientos.

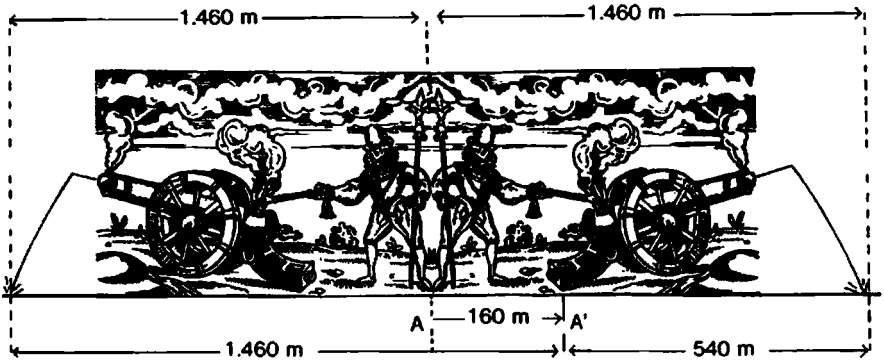


Figura 5.1.

El argumento del cañón figura 5.1. fue, sin embargo, justamente famoso. Imaginemos un par de cañones idénticos, igualmente inclinados y cargados con iguales balas y la misma cantidad de pólvora. Uno apunta al Este y el otro, al Oeste. Si se disparan, la violencia de la pólvora suspenderá un instante la caída (digamos un segundo) y las balas volarán distancias iguales, EA = OA, a Este y a Oeste (pongamos un kilómetro). Si la Tierra se moviese, durante el segundo que dura el vuelo de los proyectiles, los cañones habrían pasado de A a A' (unos 460 m), de modo que al final del experimento el impacto Oriental estría a una distancia del cañón de AE − AA' = 540 m, y el impacto del Oeste se produciría a AO + AA' = 1460 m. El movimiento de la Tierra más un poco de geometría elemental predicen que el alcance a Occidente será mayor que hacia Oriente. Sin embargo, los artilleros no colocan sus piezas al este de las posiciones que desean atacar, a fin de alcanzarlas sin ser amenazados por sus defensas artilleras; luego la Tierra no se mueve.

Los discípulos de estos copernicanos de segunda generación ya no pudieron refugiarse en el mundo supralunar de los astros desentendiéndose de la física. Como se ha visto en el Capítulo anterior, en 1577 Brahe observó un cometa cuya trayectoria atravesaba las supuestas esferas. Al año siguiente, comentando el hecho, M. Mästlin proclamó su fe en la cosmología coper-

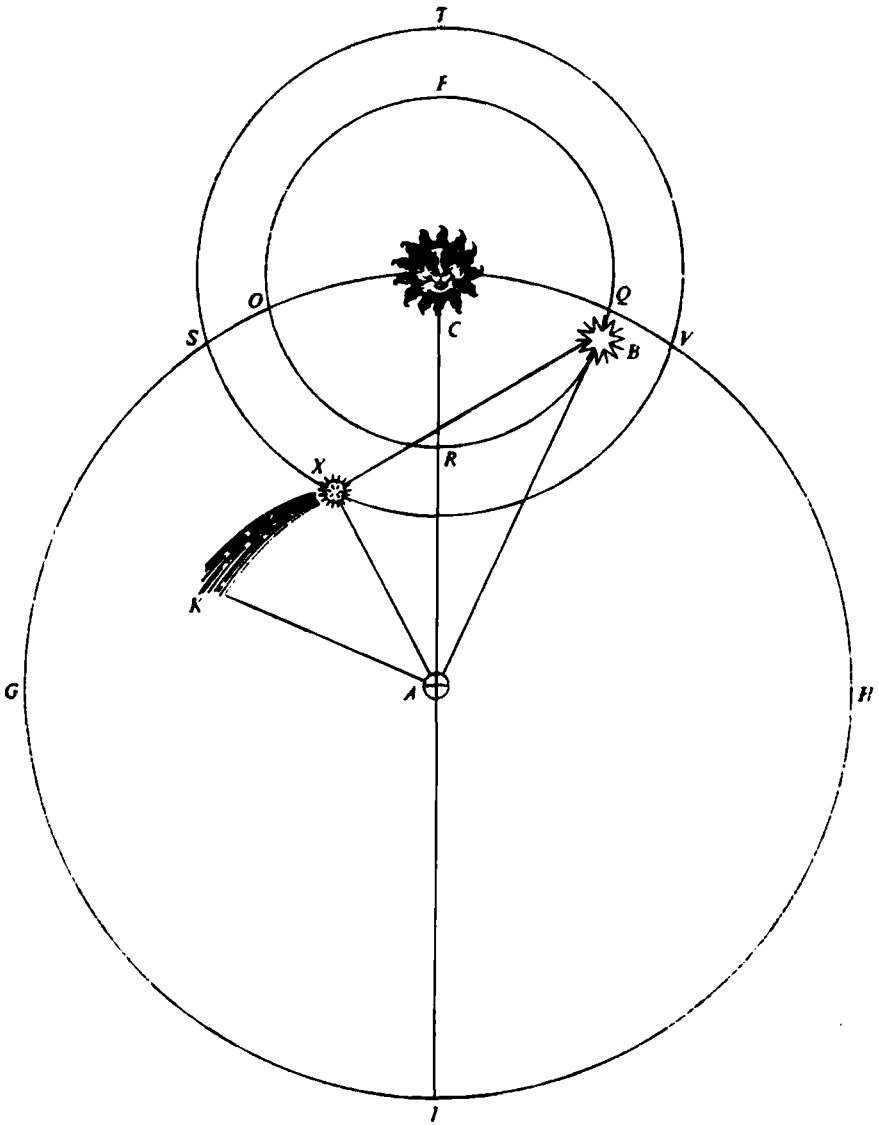


Figura 5.2. Posición del cometa de 1577 respecto al Sol y Venus, según Tycho Brahe.

nicana. Su discípulo Kepler transformó el oficio de astrónomo convirtiendo la construcción de computadores geométricos en una disciplina física en la que la derivación de los modelos se hacía por consideraciones causales de las fuerzas en acción. Mas era preciso transformar también la propia física. Si nuestro hogar se mueve, debemos notarlo, pues según la física (de Aristóteles, de Copérnico, de Bruno e incluso de Kepler) todo movimiento supone la acción de una fuerza, y tal causa siempre debe producir efectos observables. De modo que o arrojamos el copernicanismo o arrojamos las ideas físicas vigentes.

El mérito de Galileo, por lo que fue conocido y respetado, fue el de defender la verdad del movimiento terrestre, primero mediante testimonios visuales y luego a través de la elaboración de una nueva física de carácter geométrico, según la cual de las condiciones del experimento del cañón se sigue que el alcance es el mismo en ambas direcciones; vale decir, que en teoría no se puede distinguir una Tierra en reposo de una en movimiento. A la vez creyó, inconsistentemente como veremos, que podía dar pruebas físicas positivas del movimiento terrestre.

Así, a la reunificación de matemáticas y física celeste de Kepler se sumó la unión de matemáticas y física terrestre de Galileo. Según éste, poco después de terminar sus estudios de filosofía, allá a mediados de los ochenta, se convirtió al copernicanismo por influjo de dos o tres conferencias oídas a un extranjero, de quien se ha llegado a fabular que pudiera haber sido el maestro de Kepler, M. Mästlin. Para 1597 Galileo se declara copernicano en su correspondencia. A Mazzoni le dice sentirse más copernicano que aristotélico. Contraponer Copérnico a Aristóteles y no a Ptolomeo indica que Galileo no estaba interesado tanto por la astronomía matemática cuanto por la cosmología física. Ante Kepler se confiesa copernicano viejo porque, partiendo de esa posición, ha podido explicar muchos fenómenos naturales o físicos (como quizá las mareas). Así pues, Galileo se interesó desde el principio por inventar una nueva física para justificar el nuevo orden copernicano.

5.1. El derribo del orden aristotélico

El rasgo más acusado del aristotelismo era su carácter holístico y orgánico. Era una visión del mundo tan trabada y completa (abarcaba desde la lógica hasta el mejillón) que no se podía eliminar una pieza sin derrumbar el todo, algo difícil sin disponer de una alternativa de alcance comparable.

Antes de Galileo, muchos habían arañado el aristotelismo, como los escolásticos del XIV, cuya tradición estaba presente en la Italia del XVI, o como los mecánicos italianos, de Tartaglia a Benedetti. De todos ellos bebió Galileo, aunque su principal fuente de inspiración fue Arquímedes. Este

matemático del III a. C. le enseñó cómo unir el genio matemático al interés por el mundo de las máquinas, desvelando la estructura geométrica subyacente a las cuestiones de estática e hidrostática.

En un sistema mecánico, como una palanca, una fuerza vence a una resistencia y la desplaza hasta una posición de equilibrio. Esta concentración en las condiciones de equilibrio permitía eliminar el problema del movimiento, siempre reacio al tratamiento matemático de los griegos. Pero existía también la tradición de los *Problemas mecánicos* atribuídos a Aristóteles, en la que se resolvía este tipo de cuestiones por recurso a consideraciones dinámicas, atendiendo a las *velocidades virtuales* de los pesos en equilibrio en los extremos de los brazos desiguales de una barra que rota: como, en caso de moverse, recorrerían en el mismo tiempo arcos desiguales con distintas velocidades, un peso pequeño equilibrara a otro grande si sus posibles velocidades fuesen inversas de los pesos. Inicialmente Galileo aspiraba a explicar dinámicamente el movimiento de máquinas, proyectiles y graves.

Galileo fue a Pisa en 1581 a estudiar medicina, pero se encaprichó con las matemáticas, una disciplina sin salidas, y dejó la universidad cuatro años después sin obtener un título para entregarse al estudio de Euclides y Arquímedes. En 1589 entró en la Universidad de Pisa como matemático e inició una campaña de ataques al aristotelismo desde una perspectiva arquimediana, redactando borradores de un tratado *De motu*, basado en el principio de Arquímedes y en el tratamiento del impetus de Benedetti.

En el tratado se ataca sucesivamente el análisis aristotélico del movimiento natural y violento. En el caso del primero, Galileo acepta los factores aristotélicos, motor y resistencia, pero cambia su relación geométrica. En primer lugar, no es cierto que las velocidades sean como los pesos. No es necesario hacer experimentos para saberlo (no consta que Galileo hiciera el experimento de tirar pesos desde el campanario de la catedral de Pisa, pero lo hizo uno de sus profesores aristotélicos); basta un experimento mental. Imaginemos, siguiendo a Benedetti, dos cuerpos de la misma materia, uno el doble que el otro. Si aceptamos la regla aristotélica, el mayor se moverá con una velocidad doble, por lo que si le atamos el menor, más lento, lo frenará. Pero ambos cuerpos unidos son un cuerpo mayor aún que el mayor de los dos originales, por lo que debería ser vez y media más veloz. Este resultado contradictorio reduce al absurdo la premisa de que se deriva, relativa a la proporcionalidad de velocidad y peso.

En cuanto a que sea inversamente como la resistencia derivada de la densidad de los medios, imaginemos que el agua sea mil veces más densa que el aire. Eso quiere decir que un cuerpo poseerá en el agua una velocidad de descenso de una milésima de la que tenía en el aire; pero un tronco no desciende en el agua ni con una milésima ni con una millonésima, simplemente flota.

La alternativa galileana es utilizar el principio hidrostático de Arquímedes como modelo de cómo combinar los factores dinámicos del movimiento. Peso y resistencia son fuerzas contrapuestas como las que actúan sobre los platillos de la balanza, y el comportamiento de un cuerpo será el resultado de la comparación de su peso propio con el de un volumen igual del medio que debe elevar para poder descender. Si la diferencia es positiva, el cuerpo será pesado en ese medio; si es negativa, será ligero; si es nula, flotará. Las paradojas apuntadas se disuelven. Los cuerpos homogéneos descienden con igual velocidad porque sus diferencias de gravedad, que son como los volúmenes, quedan compensadas por resistencias estrictamente proporcionales a los volúmenes. En el caso de la madera, la intensidad y sentido del movimiento dependerá del signo y magnitud de la resta arquimediana señalada.

Pasando a los movimientos violentos, el papel motor otorgado al aire por Aristóteles recibe críticas ya clásicas: lanzamientos contra el viento, rotaciones de peonzas en las que la llama de una vela no descubre movimientos de aire, etc. Por el contrario, el motor original imprime un impetus interpretado como privación accidental de gravedad que remite paulatina y espontáneamente. Como en el caso del movimiento natural, la fuerza efectiva que mueve al cuerpo es la diferencia entre la gravedad natural y la levedad accidental. Según que esa magnitud sea positiva o negativa, el cuerpo descenderá o ascenderá. Pero como el sustraendo disminuye constantemente, la fuerza efectiva de descenso aumentará hasta que el impetus se extinga, momento en que el móvil alcanzará la velocidad final y uniforme correspondiente a su peso específico. Si el cuerpo asciende, la disminución del impetus hace que decelere hasta que peso e impetus se igualen, momento indivisible en que la diferencia comienza a ser positiva, con lo que el cuerpo descenderá acelerando hasta la extinción total del impetus.

Galileo ha hecho un notable esfuerzo de geometrizar el problema dinámico del movimiento, logrando una simplificación notable. La distinción entre ligero y pesado, siendo relativa, no precisa reduplicarse en una tipología de elementos caracterizados por cualidades ponderales. Sólo hay un tipo de materia que tiende a su centro de gravedad con intensidad variable según la densidad. Por otro lado, los centros de gravedad relativizan la jerarquía cósmica de los lugares naturales, rompiendo la distinción entre el mundo de los astros y el de la Tierra. Pero sigue preso de las concepciones aristotélicas de base: el movimiento de caída es función del peso, de manera que una causa constante (el peso) produce un efecto (velocidad) uniforme. Las variaciones de velocidad obedecen a variaciones del motor, por lo que la aceleración es un fenómeno accidental, uno de esos «impedimentos» de la materia, como el rozamiento, que empañan la pura manifestación de la ley matemática. Galileo obtuvo, como veremos, la ley de equilibrio de pesos en planos inclinados, pero a la hora de relacionarla con las velocidades de descenso

obvió la aceleración, reduciendo los problemas dinámicos a equilibrio de pesos con desplazamientos infinitesimales, lo que produjo discrepancias con la observación que tal vez expliquen el abandono del tratado.

5.2. Ingeniero en Padua

Galileo tenía una agudeza y gracia oceánicas para tomar el pelo a los colegas aristotélicos, de manera que cuando se le acabó el contrato en Pisa no disponía de muchos apoyos y hubo de marchar a la universidad veneciana de Padua. Venecia era una república de navegantes y comerciantes de espíritu libre. Por ejemplo, en una ocasión en que los enviados papales exigían la quema de libros, la autoridad competente les indicó que podían quemar cuantos gustasen siempre y cuando los compraran antes. Si Galileo no se hubiera movido de Venecia, no hubiera caído en las garras de la Santa Inquisición.

En Venecia existía un interés enorme por cuestiones mecánicas prácticas y Galileo usaba visitar los astilleros, en los que encontraba amplia ocasión de especular sobre la aplicación de la geometría a la naturaleza. En este ambiente escribió un tratado de máquinas, *Le meccaniche* (1593-4), en el que trata de sistematizar deductivamente su funcionamiento. Todas ellas se ven como variaciones de palancas, que se asimilan a la balanza, la cual a su vez se remite a las peripatéticas velocidades virtuales de diámetros de círculo, lo que indica el continuado interés del joven Galileo por conectar la perfección geométrica de la estática con las consideraciones dinámicas propias del movimiento. Uno de los elementos claves de esta transición entre dinámica y estática era el plano inclinado, tomado de la tradición medieval de la ciencia de los pesos de Jordano Nemorario.

En conexión con el plano, Galileo formuló el concepto clave de *momento de descenso*. La fuerza natural de la gravedad puede actuar libremente, como en las caídas, o puede modificarse cuando el peso está inserto en una máquina, como una balanza o un plano inclinado. El momento galileano es la modificación de la fuerza natural, la gravedad, compatible con el movimiento en un sistema mecánico. Hay un momento *estático* que depende del brazo de giro, con lo que un peso pequeño con un brazo largo tiene el mismo momento que un cuerpo grande con un brazo menor en la misma proporción, y de ahí la ley de la palanca. Asimismo está el momento *dinámico* en el que lo que se consideran son las velocidades virtuales. Pues bien, el momento de *descenso* en planos inclinados es la modificación de la gravedad según la inclinación del plano, que es nula en el plano vertical e igual al peso en el horizontal; esto es, en un plano vertical, el momento es igual a la gravedad y en uno horizontal es igual a cero, con todos los valores intermedios correspondientes a los diversos ángulos de inclinación. Galileo de-

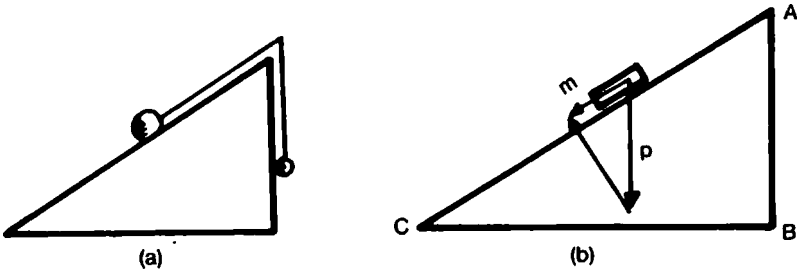


Figura 5.3. *a)* El contrapeso que equilibra por la vertical al grave que desciende por el plano es menor que éste. *b)* Relación entre la gravedad *(p)* y el momento de descenso por el plano *(m)*: p / m = AC / AB.

muestra en general que el momento de descenso (m) por un plano es a la gravedad (p) como la altura del plano, AB, es a su longitud, AC.

Hay varias consecuencias de esto, una de las cuales se relaciona con los problemas del *De motu*. Dado que la fuerza motriz varía continuamente con la inclinación del plano, siempre se podrá hallar una inclinación para la que la fuerza de descenso sea menor que el peso de un volumen igual del medio, con lo que contra toda evidencia el cuerpo debería de ascender, arruinando el enfoque estático arquimediano.

Otra consecuencia es que, frente a lo que ocurre con el momento dinámico, que varía con la velocidad, el momento de descenso es constante en todo el plano, pues depende de su inclinación. Por otro lado, hacer experimentos y mediciones con un plano de poca inclinación es infinitamente más fácil que con la caída libre, de manera que cuando al cabo de un par de lustros Galileo reconozca el carácter esencialmente acelerado del movimiento por un plano inclinado, tendrá que remitirlo a la acción de una fuerza constante.

Una tercera consecuencia de importancia es la constatación de que en un plano horizontal que ni asciende ni desciende, el momento es nulo, no hay fuerza alguna y el cuerpo es indiferente al movimiento o al reposo, de modo que una impulsión mínima lo hará moverse eternamente (poniendo entre paréntesis, naturalmente, el «impedimento» del rozamiento). Obviamente el plano horizontal es una licencia geométrica válida para distancias pequeñas, pues a escala planetaria un plano horizontal tangente a la Tierra en un punto desciende hacia dicho punto y asciende desde dicho punto. En realidad el plano en que el momento es nulo, el que ni asciende ni desciende y en el que movimiento se conserva indefinidamente, es una superficie esférica, que es el sostén cosmológico del principio galileano de inercia circular.

Para 1604 Galileo había descubierto ya experimentalmente la ley de la caída de los cuerpos. Encontró probablemente que los espacios recorridos

intervalos de tiempo	espacios recorridos en cada intervalo	espacios totales	t^2
1	1	1	1
2	3	4	4
3	5	9	9
4	7	16	16
5	9	25	25
...	...	...	...

en tiempos iguales sucesivos son como los números impares. Por consiguiente (véase la Tabla), los espacios totales recorridos son como los cuadrados de los tiempos, ya que los impares consecutivos son las diferencias de los cuadrados consecutivos. El problema es que en una ciencia geometrizada no hay lugar para generalizaciones empíricas y Galileo buscó un principio del cual derivar esta relación, suponiendo equivocadamente que se deducía de una definición de movimiento uniformemente acelerado según la cual en espacios sucesivos cualesquiera iguales se reciben incrementos iguales de velocidad. En la Figura, AB es el espacio atravesado y AC la línea que marca el crecimiento uniforme de las velocidades representadas por las perpendiculares ef, gh, ID, BC.

Hubo de transcurrir un lustro más hasta que Galileo se diera cuenta de su error, que expone mediante una reducción al absurdo. Si el crecimiento de la velocidad fuese como el espacio, entonces ID / AI = BC / AB. Supongamos que el grave atraviesa AI en un segundo con una velocidad uniforme de 1 / 2 de ID, según la regla mertoniana del grado medio de velocidad que vimos en el Capitulo II. ¿En cuánto tiempo atravesará AB? Dado que, según la idea de que las velocidades son como los espacios, la velocidad en B debe ser BC, la regla del grado medio indica que el movimiento acelerado es igual a un movimiento uniforme con un grado igual a 1 / 2 de BC, que es el doble de 1 / 2 de ID. De modo que si AI se pasaba en un segundo, el doble de AI, con una velocidad doble, se pasará también en un segundo. Luego un móvil tardará un segundo en atravesar AI y su doble AB, estando a la vez en I y en B. Tal absurdo llevó a Galileo a negar la hipótesis de partida y a sustituirla por aquella que estudiamos en la escuela y que hace depender del tiempo el crecimiento de la velocidad.

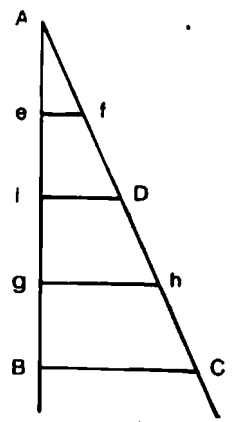


Figura 5.4.

.3. El giro astronómico de Galileo

En 1604 apareció una supernova y entonces, ante la prometedora irrup-
ón de un cambio en los cielos, inmutables según Aristóteles, empezó a
teresarse por la astronomía y a dar conferencias sobre el particular. Pero
mayor distración de sus estudios dinámicos se produjo en 1609 con el
:sarrollo de su telescopio y lo que con él descubrió. Y esa fue su perdición;
imero porque halagó a los Medici hasta que éstos se lo llevaron a Floren-
a, República menos independiente del Papa, y segundo, porque se con-
nció de la defendibilidad de la cosmología copernicana y decidió dedicar
s esfuerzos a justificarla físicamente. En 1613, con ocasión de la polémica
n los jesuitas acerca del descubrimiento e interpretación de las manchas
lares, se declaró copernicano en letra impresa, lo que dio pie a agrios
:bates en los que se le acusó de impiedad, terminando el asunto en 1616
n la condena retrospectiva de Copérnico.

Poco después, reorganizó sus descubrimientos sobre el movimiento,
ıblicados veinte años más tarde en los *Discorsi e dimostrationi matematiche
torno due nuove scienze* (1638) abandonando el intento de fundamentarlos
námicamente y adoptando una perspectiva cinemática puramente des-
iptiva. En cualquier caso, en 1623 su antiguo amigo y protector, Maffeo
arberini, llegó a Pape con el alias de Urbano VIII y Galileo decidió que la
a anticopernicana podía ser domada. En 1632 publicó un *Diálogo sobre los
s máximos sistemas del mundo, el ptolemaico y el copernicano* donde, como
ce en el prólogo, «trataré de demostrar que todos los experimentos practi-
ıbles sobre la Tierra no bastan para probar su movimiento», pues según
ıs principios de conservación y composición de velocidades resulta indis-
nguible el reposo ptolemaico del movimiento circular copernicano que ni
: aleja ni acerca al centro.

La primera parte del *Diálogo* se orienta a construir un marco cosmoló-
.co al gran estilo aristotélico, pero con unos principios que no hagan
bsurdo el movimiento de la Tierra. Los centros de gravedad se multiplican
relativizan, con lo que de paso se elimina la dicotomía entre mundo
:leste y terrestre, y el movimiento circular que vemos en los astros conviene
ımbién a la Tierra. El *orden cósmico* sólo se mantiene con el reposo o con el
ıovimiento circular o rotatorio, que no implican fuerzas y son por tanto
ternos. También desaparecen los lugares naturales, pues el espacio es el del
eómetra, uniforme e isotrópico, y con ellos los elementos con cualidades
onderales, pues no hay más que una materia uniforme con una tendencia
omún al centro de gravedad del sistema, y que se diversifica según su den-
idad con la que compite contra las partes del medio en que se mueve.

Con este marco, Galileo procede a refutar en la segunda parte los argu-
ıentos clásicos contra el movimiento de la Tierra. A la relatividad óptica de
ɔs escolásticos del XIV (las apariencias de los cielos pueden explicarse supo-

niendo que la Tierra gira) une un principio de relatividad mecánica según el cual donde no hay fuerzas actuantes (causas), no hay efectos perceptibles. Como el reposo y el movimiento circular (por un «plano» sin *momento*) no precisan causa, resultan ser estados indistinguibles. Desde dentro de un sistema con movimiento tal, las relaciones entre las partes son constantes, exactamente como si se hallara en reposo. Aunque una nave vaya de Venecia a Alepo, si la mar está bella, desde dentro de nuestro camarote todo transcurre como si no hubiese movimiento, ya que nada altera las relaciones mutuas de los objetos porque «el movimiento es común y se participa igualmente en él».

Lo que pasa con los argumentos clásicos contra el movimiento diurno es que razonaban como si los movimientos violentos considerados partiesen del reposo absoluto, con lo que se distinguirían del movimiento terrestre. Sin embargo todos los objetos sobre los que operamos experimentalmente forman parte del sistema y participan de un movimiento que, siendo circular, se conserva indefinidamente. Tomemos como ejemplo el argumento de Brahe.

Su fallo estriba en que no combina realmente el movimiento inercial (terrestre) de la bala con el violento de la pólvora, sino que estimaba éste como si la bala no estuviese en reposo respecto a la Tierra, o como si el cañón estuviese fuera de la Tierra. Por ello Tycho Brahe no sumaba y restaba velocidades, sino espacios: al espacio recorrido por la bala hacia Oriente (E) se restaba el espacio recorrido por ésta en el mismo tiempo (E'), de modo que el alcance del disparo era E - E'; dicho a nuestro modo, llamando *v* a la velocidad de la bala debida a la pólvora y *v'* a la de la Tierra, $E - E' = vt - v't = (v - v')t$. Si el disparo es hacia Occidente, el alcance era $E + E' = vt + v't = (v + v')t$, claramente distinto del anterior.

Para Galileo, la bala tiene la velocidad hacia Oriente de la Tierra (que no es más que el cañón, la bala, Ticho Brahe, su perro y unos cuantos millones de cosas más). Así, en el tiro hacia Oriente, la pólvora añade una velocidada una bala que ya tiene una v' respecto a las estrellas, por ejemplo. El resultado es $v + v'$. El espacio recorrido en un tiempo dato t respecto a las estrellas será $(v + v')t$, pero como mientras tanto la Tierra se ha desplazado $v't$ en el mismo sentido, el alcance será $(v + v')t - v't = vt$. La bala disparada al Oeste recibirá una velocidad v de la pólvora que, sumada a la de la Tierra en sentido contrario, $-v'$, dará como resultado una velocidad respecto a las fijas de $v - v'$, y el espacio recorrido será $(v - v')t$; pero mientras tanto la Tierra se ha alejado hacia oriente $v't$, luego el alcance efectivo será $(v - v')t + v't = vt$. Exactamente igual que en el caso anterior, y exactamente igual que si la Tierra estuviese en reposo absoluto. Luego los experimentos mecánicos no pueden demostrar en principio que el movimiento de la Tierra sea más absurdo que el reposo.

Con eso quedaría cumplido el objetivo señalado en el prólogo; pero

Galileo, convencido por sus observaciones astronómicas y por el asombroso encaje de tantas evidencias de la verdad del copernicanismo, deseaba aportar pruebas positivas del movimiento terrestre y no argumentos acerca de su mera posibilidad. Además, el cardenal, astrónomo, inquisidor y santo Roberto Bellarmino, que ya había quemado a Giordano Bruno en 1600, le dijo a Galileo que si probaba el movimiento terrestre sin ambages, los teólogos papales se encargarían de reinterpretar las Escrituras contrarias al hecho; pero que hasta tanto no dispusiese de tal prueba, se abstuviese de marear a sus eminencias con pendejadas. Así que Galileo se lanzó a ofrecer su prueba positiva, la teoría de las mareas, a la que quizá aludiese en la carta a Kepler de 1597 cuando decía que con el copernicanismo se explicaban muchas cosas.

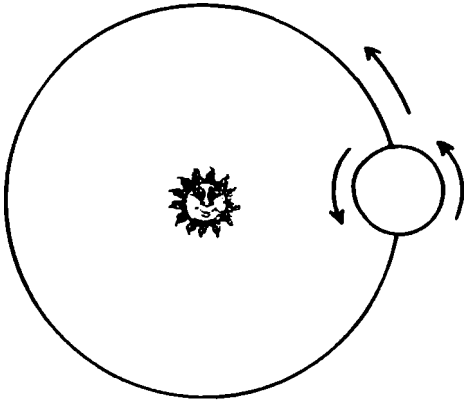


Figura 5.5.

Según esta teoría (figura 5.5.) durante la noche las cuencas marinas viajan a una velocidad que es la suma de la traslacional más la rotacional, mientras que de día viajan con una igual a su diferencia. Tales acelerones y frenazos producen en los mares oscilaciones semejantes a las que presenta el caldo de una sopera manejada por un camarero bisoño. Así se predice una marea diaria y no casi dos, como realmente ocurre; pero eso no es lo grave. Lo más importante es que Galileo contradice el marco mecánico que él mismo había construido, en el que el movimiento circular (sea la rotación o la traslación terrestre) era inercial e inobservable. En realidad quienes hemos hecho el bachillerato sabemos que un movimiento circular, aunque presente una velocidad angular uniforme, es un movimiento acelerado que cambia continuamente de dirección, lo que exije una fuerza. Y allí donde hay fuerzas, hay efectos observables. Pero eso es justamente la negación del argumento galileano contra las críticas al movimiento de la Tierra, que consistía en identificar mecánicamente reposo y movimiento circular.

¡Qué vueltas da la vida! Resulta que Galileo está sobre la pista de varios efectos del movimiento de la Tierra cuya observación sería posible en principio: Por ejemplo, al discutir el problema de la centrifugación, constata que las velocidades de los radios mayores superan a las de los radios menores. Ello implica (véase la figura 5.6.), como subrayará Borelli 36 años más tarde, que una piedra soltada desde la cúspide A de una alta torre EA no sólo no se retrasará a Occidente, como querían los aristotélicos, sino que se adelantará hacia Oriente, ofreciendo así una prueba crucial entre ambas doctrinas. En efecto, si el movimiento circular se conserva intacto aunque se mezcle con el acelerado de caída, cuando llegue a Tierra la piedra habrá recorrido la misma distancia OE = MA que si no hubiera descendido, alejándose así OH del pie de la torre.

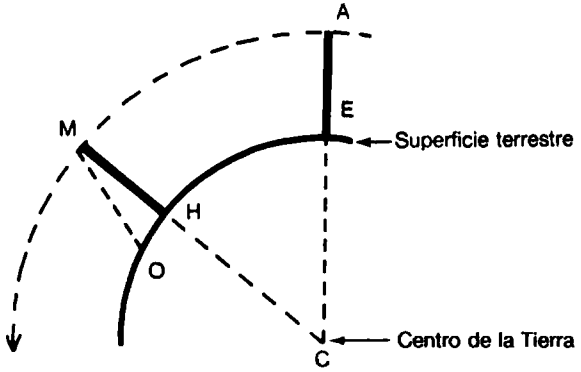


Figura 5.6.

Otro lindo efecto del movimiento terrestre que Galileo está a punto de ver es lo que se suele llamar la aceleración de Coriolis, tan importante en meteorología (de la circulación de anticiclones y bajas a los alisios). En efecto, al considerar el disparo de un cañón hacia el ecuador, señala que se desviará a la derecha del blanco (en el hemisferio norte) debido a que la velocidad lineal del movimiento diurno es menor cuanto menor es el paralelo; por ejemplo, si el cañón está en Florencia, se moverá con la Tierra a unos 335 m / seg, 129 m / seg menos que el blanco situado en el ecuador, digamos en Libreville (Gabón), por lo que cuando llegue allí la bala al cabo de un tiempecito, Libreville y sus alegres habitadores estarán a salvo muy al oriente. Sin embargo, resistencias aparte, la bala habrá recorrido hacia oriente el mismo espacio que Florencia por su paralelo menor.

En el XVII no hubiera sido nada fácil medir estos efectos, pero además su planteamiento estaba estorbado por la concepción galileana de la inercia circular. La mecánica galileana no es aún la mecánica clásica, aunque en ocasiones lo parezca. Por ejemplo, cuando se ocupe de problemas de laboratorio, a escala manipulable, como en el caso de péndulos, planos inclina-

dos o proyectiles, los arcos del movimiento inercial son a todos los efectos prácticos líneas rectas, por lo que da la impresión de usar un principio de inercia rectilínea. Así ocurre en los *Discorsi* (1638), publicado clandestinamente en el extranjero, como vamos a ver.

Galileo, como Copérnico y todos cuantos realizaron un cambio radical en el pensamiento, está en ciertos aspectos del lado de acá de la frontera y, en otros, aún del de allá. A ello contribuyó su viejo amigo el Papa condenándolo en 1633 a cadena perpetua, luego sustituida por un arresto domiciliario tan severo que no le permitía ir a misa o al oculista (por lo que se quedó ciego). En 1634, volvió de nuevo sobre el movimiento sin tratar ya el problema cosmológico. También renunció a fundamentar sus descubrimientos sobre principios dinámicos, como ya dijimos, adoptando un enfoque puramente geométrico en el que a partir de unas definiciones se obtienen las leyes cinemáticas delmovimiento. Un movimiento uniforme es el que recorre espacios iguales en tiempos cualesquiera iguales. Nada se dice de si se conserva o no, sino que tan sólo se derivan unos teoremas triviales acerca de las relaciones entre espacios, velocidades y tiempos. El movimiento uniformemente acelerado se define como aquél que en tiempos iguales cualesquiera recibe incrementos iguales de velocidad. Esta definición se justifica porque lo que de ella se deriva concuerda con las mediciones experimentales. Nada se explica acerca de la causa de que los graves caigan ni de qué sea la gravedad. A partir de la definición se obtienen varios teoremas, el primero de los cuales es el del grado medio que permite sustituir un movimiento acelerado por otro uniforme, el segundo establece que los espacios son como los cuadrados de los tiempos (cosa que había medido), etc., hasta un total de 38 Proposiciones. La cuarta y última parte está dedicada al movimiento de los proyectiles, un viejo tema de estudio en Italia. En ella demuestra 14 Proposiciones tan interesantes como útiles, la más importante de las cuales es la derivación de la tan discutida trayectoria de los proyectiles, que Galileo identifica con una parábola.

Las condiciones de la demostración son interesantes. Una de ellas es que las líneas de descenso de un proyectil en diferentes partes de la trayectoria sean paralelas entre sí y no convergentes en el centro de la Tierra, donde realmente tienden. Otra es que no haya rozamiento. La tercera, que un móvil proyectado sobre un plano horizontal posea un movimiento uniforme y perpetuo en línea recta. Todas ellas son empíricamente falsas, pero se adoptan como licencias geométricas porque «en la práctica nuestros instrumentos y las distancias con las que operamos son tan pequeñas en comparación con la distancia al centro de la Tierra, que podemos tomar tranquilamente un minuto de arco por una recta».

Tras recordar que una parábola es una sección cónica (figura 5.7.) en la que $bd^2 / fe^2 = da / ea$, muestra que esa es la curva seguida por un proyectil dotado de un movimiento inercial rectilíneo y un movimiento acelerado de

caída. Eso es algo que sabía Galileo desde principios de siglo al observar que el tiempo de vuelo de todos los proyectiles lanzados desde la misma altura es idéntico, sea cual sea su alcance: esto es, el tiempo es lo que tarde el proyectil en caer desde la boca del cañón al suelo partiendo del reposo. Si además en ese tiempo se le comunica una velocidad horizontal grande o pequeña, en nada interfiere con la caída. Para saber cuál es la trayectoria, no hay más que computar ambos movimientos por separado. En la figura 5.8, el proyectil, una vez abandonado el soporte ab, seguirá moviéndose de manera rectilínea uniforme, de manera que tras cada segundo habrá recorrido distancias iguales 0-1, 1-2, 2-3, etc. hacia la izquierda. Por lo que respecta al movimiento acelerado, descenderá en cada segundo espacios que son como los números impares, 1 en el primero, 3 en el segundo, 5 en el tercero, etc. La combinación de esos movimientos de la curva que pasa por los puntos (1,1) (2,4) (3,9) (4,16) (5,25) etc. ¿Qué curva es esa? Repárese en que los números de la abscisas son espacios o tiempos, pues en el movimiento uniforme los espacios son como los tiempos. Repárese asimismo en que los números de las ordenadas correspondientes son como sus cuadrados, ya que en el movimiento uniformemente acelerado los espacios son como los cuadrados de los tiempos. Luego, por ejemplo, $(2/3)^2 = 4/9$ o $(3/4)^2 = 9/16$, como corresponde a la definición de parábola dada más arriba.

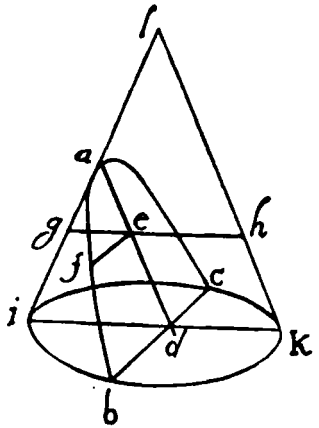


Figura 5.7.

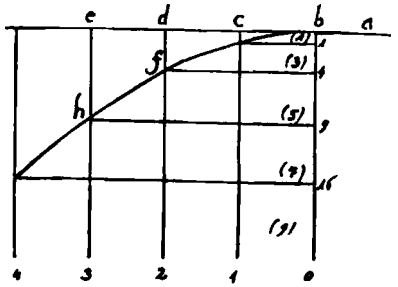


Figura 5.8.

Desgraciadamente el tratado estaba en italiano y fue poco leído en Europa, pues no se tradujo al latín hasta 1700, cuando la obra de Newton lo había convertido en una antigualla. De todos modos, tan importante como su cinemática es la visión de la naturaleza plasmada en la primera parte, donde adopta una versión de la doctrina atomista que compone el mundo a base de átomos y vacío, en la que los corpúsculos mínimos no son extensos, a fin de adecuarse al atomismo matemático de los indivisibles. De esta manera las ciencias matemáticas clásicas y la física se funden por vez primera desde los viejos tiempos de los pitagóricos, incluyendo entre ellos a ese gran pitagórico que a estos efectos fue Platón. Si el espacio físico vacío es

neutral respecto a los lugares y direcciones, es como el espacio geométrico; y si los puntos que componen la materia son como los indivisibles que componen las magnitudes continuas, entonces las propiedades de la materia son geométricas, las cualidades son apariencias y las matemáticas son el lenguaje de la física. Quien desarrolló y difundió esta doctrina fue R. Descartes, de quien nos ocuparemos ahora.

5.4. Máquinas contra magos

La esencia de la naturaleza, decía el buen Aristóteles, es el movimiento, de manera que si se conoce éste se domina aquélla. Galileo convirtió el viejo problema del movimiento local en una nueva ciencia geométrica, con lo que la clave de la naturaleza resultó ser matemática. Ello implicaba un cambio drástico en la ontología, relativo a las piezas básicas que forman el mundo.

Descartes fue sin duda el nuevo filósofo de la naturaleza geometrizada. En 1619 dio los primeros pasos en el descubrimiento de la geometría analítica y en noviembre tuvo unos extraños sueños cabe una estufa que él interpretó como el desvelamiento de su misión de reconstruir todas las ciencias con procedimientos inspirados en el proceder matemático.

Galileo consideraba que la naturaleza estaba escrita en lenguaje matemático, cuyos caracteres eran triángulos y círculos, y para verla en esos términos era preciso atender a las propiedades primarias de carácter geométrico en detrimento de los aspectos cualitativos secundarios. Descartes elaboró esta idea de manera explícita y radical, definiendo la materia como mera extensión espacial. Los cuerpos son partes de esa extensión determinadas por su movimiento relativo. El movimiento explica las propiedades básicas de la materia. Un cuerpo es fluido si sus partes se mueven entre sí y sólido si no ocurre tal cosa; es duro si sus partes resisten la penetración de otros cuerpos en movimiento, y blando en caso contrario. Como se ve, estas propiedades se definen a base de extensión (un concepto geométrico) y movimiento (el objeto de la nueva ciencia matemática de Galileo).

Así pues, la proteica diversidad de la experiencia no es en último extremo más que extensión y movimiento. El mundo de las cualidades peripatéticas o paracelsianas son pura apariencia secundaria. La distinción entre cualidades primarias (enraizadas en la geometría de la materia) y secundarias (dependientes de nuestro aparato perceptivo) fue ilustrada por el Obispo Berkeley con un bonito ejemplo. Si en una noche de helada paseamos con una mano en el bolsillo y otra al aire, y al retornar a casa las introducimos ambas en un barreño de agua tibia, una de ellas parecerá arder, mientras que la otra sentirá frío. Frío y calor no son propiedades del agua, sino de su interacción con nosotros; en el agua sólo hay moléculas con una energía cinética media determinada, vale decir, materia y movimiento. Lo mismo

ocurre con los colores, sabores u olores; podemos pensar la materia sin ellos, pero no sin la extensión, forma y tamaño que son sus cualidades primarias geometrizables.

Esta reducción de toda interacción y fenómeno a operaciones mecánicas de materia en movimiento era ideológicamente atractiva contra el naturalismo hermético y el entusiasmo bruniano ante una naturaleza animada transida por fuerzas y emanaciones espirituales. La materia pasiva e inerte del mecanicismo borraba de un golpe las aspiraciones neoplatónicas de ascesis personal y renacimiento individual a través de manipulaciones mágicas, alquímicas, cabalíticas y heréticas. Las revueltas campesinas se habían apoyado en perspectivas religiosas autónomas y radicales, por lo que remitir de nuevo toda autoridad a la Iglesia y al Estado absolutista coincidía con el despojo de la naturaleza de fuerzas mágicas utilizables por el mago *free lance*.

Como Boyle y los fundadores de la Sociedad Real londinense un cuarto de siglo más tarde, Descartes era persona de orden (ocultó su copernicanismo al enterarse de la condena de Galileo). Como luego los ingleses, huía tanto del entusiasmo hermético como del escepticismo de tantos intelectuales europeos hartos del fanatismo ideológico, político y religioso que había arrasado Europa. Descartes halló el antídoto contra el escepticismo en las evidencias del tipo de las matemáticas encontradas en el propio yo. El sujeto trascendental que duda, debe existir para dudar. A partir de ahí, y mediante una versión del argumento ontológico, se recupera la idea de un Dios garante del orden geométrico de las ideas y de la veracidad de las evidencias claras y distintas. Estas cosas se expusieron en el famoso *Discurso del método* (1637) que prolongaba sus contribuciones a la ciencia: *La geometría, Los meteoros* y *La dióptrica*.

La filosofía cartesiana representaba una escapatoria ordenada tanto de la anomia escéptica como de los heroicos furores radicales; adecuaba la idea de la naturaleza a las nuevas ciencias matemáticas emergentes, y reconstruía la unidad del saber disgregado con la disrupción del aristotelismo. Además produjo sus propias contribuciones científicas substantivas y ofreció muchos ejemplos de cómo enfocar problemas en términos mecánicos y geométricos.

5.5. La máquina sin sortilegios

Los *Principios de la filosofía* (1644) fueron en este sentido un libro de referencia. Está dividido en cuatro partes: en la primera expone los primeros fundamentos filosóficos, en la segunda, los principios físicos, en la tercera deriva de ellos los fenómenos celestes y en la cuarta, los terrestres.

En la segunda elabora su manera de anclar la geometría en la naturaleza a través de la definición de cuerpo como mera extensión (lo que de

paso implica la exclusión del vacío), susceptible de movimiento. Estas dos entidades, extensión y movimiento, son los principios de las cosas naturales. Pero frente a las atracciones, afinidades, simpatías, fermentos y acciones a distancia oscuras y confusas, no existen fuentes naturales de actividad. La materia es pasiva e inerte, por lo que en el mundo físico no hay lugar para fuerzas capaces de crear movimiento. En realidad lo que *parecen* fuerzas, como la gravedad, el magnetismo o la luz, no son sino impactos mecánicos de partículas ya en movimiento o presiones de fluidos.

¿De dónde proviene entonces el movimiento del mundo? Como la materia, de la acción creadora de un Dios mecánico. Del mismo modo que creó la materia que podemos dividir o juntar pero que sólo él puede aniquilar, creó también una cantidad dada de movimiento que las partes de materia pueden intercambiar, dividir o juntar, pero que se conserva sin destruirse. Por tanto, la clave de todas las operaciones e interacciones físicas está en esos intercambios de movimiento que dividen la extensión en partículas diversas para componer el espectáculo de la naturaleza. La primera de ellas es una especie de elogio de la pereza antes de Lafargue: todo permanece en el estado en que se halle mientras nada externo interfiera. De ahí que, frente a lo que creían desde Aristóteles hasta Kepler, no hace falta ningún motor o causa, antiperistasis o impetus, para explicar el vuelo de la flecha; lo que exige una causa es su extinción. La segunda formula el principio clásico de inercia rectilínea, que es algo ideal, pues sólo se daría en un vacío que no existe. En condiciones reales todo se mueve en medios resistentes cuyas partículas han de ser apartadas.

La tercera ley se orienta a regular los intercambios de movimiento en choques. Mas aquí la línea deductiva cartesiana se quiebra pues en ámbitos desusados, sin experimentos sistemáticos, las intuiciones claras y distintas no funcionan. (En otros campos en los que no cree tener idea, como en fisiología, Descartes era tan experimentalista como el que más.) Así pues, en la tercera ley Descartes cree que si un cuerpo se topa con otro con más materia inerte, rebotará sin perder nada de su rapidez, como una bola de billar que choca con una banda; pero si se encuentra con otro menor, lo arrastrará consigo perdiendo tanto cuanto le comunica. De ahí deriva siete reglas de impacto cuyo carácter erróneo mostraron C. Huygens y Leibniz, como veremos en el Capítulo siguiente.

Pero aunque fuesen correctas la situación no mejoraría. En efecto, las reglas estaban formuladas en un contexto ideal de pares de cuerpos en el vacío, sin interferencia con el medio. A la hora de pasar a la situación real, el número y complejidad de las interacciones es tal que Descartes sustituye el análisis por la imaginación de los resultados finales en una gran síntesis. Esto es, la realización del programa de una ciencia matemática sólo se puede realizar en aspectos concretos muy parciales, y aún así, recurriendo a la construcción de modelos con condiciones convenientes aunque falsas

con tal de cubrir deductivamente las apariencias al modo de los astrónomos de siglos anteriores.

En la Parte tercera, sobre el mundo celeste, Descartes sabe que el movimiento inercial rectilíneo no puede ir muy lejos en un mundo pleno, por más infinito que pueda ser; de manera que los choques e intercambios de movimiento tienen que acabar degenerando en grandes vórtices de materia. Comienza imaginando que la materia uniforme y divisible al infinito, como la magnitud continua que constituye la extensión, se halla dividida en tres tipos de partículas que funcionan en la práctica como elementos, casi como átomos. Las partículas más gruesas y groseras componen los cuerpos de los planetas y cuanto contienen, las partículas más sutiles, redondas y uniformes llenan los espacios interplanetarios e interatómicos, constituyendo un éter capaz de transmitir instantáneamente las interacciones de los cuerpos separados. De este modo se puede explicar mecánicamente la apariencia de acciones a distancia entre astros. Por último, las partículas más finas y ágiles constituyen el elemento fuego que forma el Sol y las estrellas.

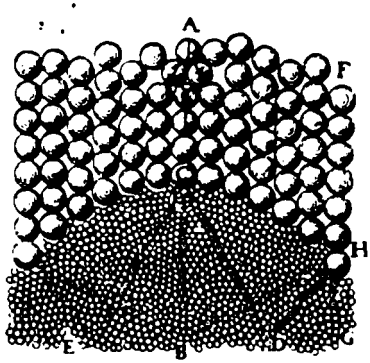


Figura 5.9.

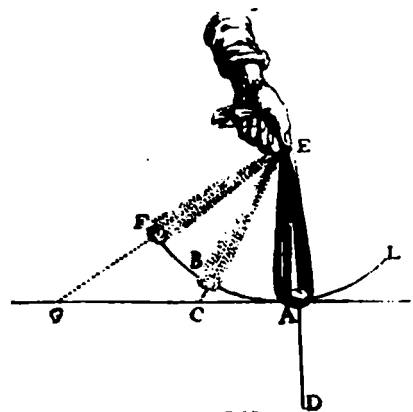


Figura 5.10.

La luz del Sol representa un buen ejemplo de las explicaciones mecánicas cartesianas. El primer elemento (bolas menores) que gira en la estrella solar tiende a salir tangencialmente por mor de la inercia rectilínea (como la piedra de la honda), cosa que impide el segundo elemento o éter circundante (bolas mayores). Ahora bien, éste recibe la constante presión del fuego y, dada su estructura, la transmite instantáneamente hasta la Tierra, donde el sentido experimenta esa presión (cualidad primaria) como el cursi rosicler de los poetas (cualidad secundaria).

Otro lo constituye el sistema planetario. Suponiendo (figura 5.11.) un vórtice para cada estrella, y suponiendo que la materia próxima al Sol, en el centro de su vórtice, es más rápida que la más lejana, basta hacer flotar a los planetas a distancias adecuadas para obtener los períodos observados.

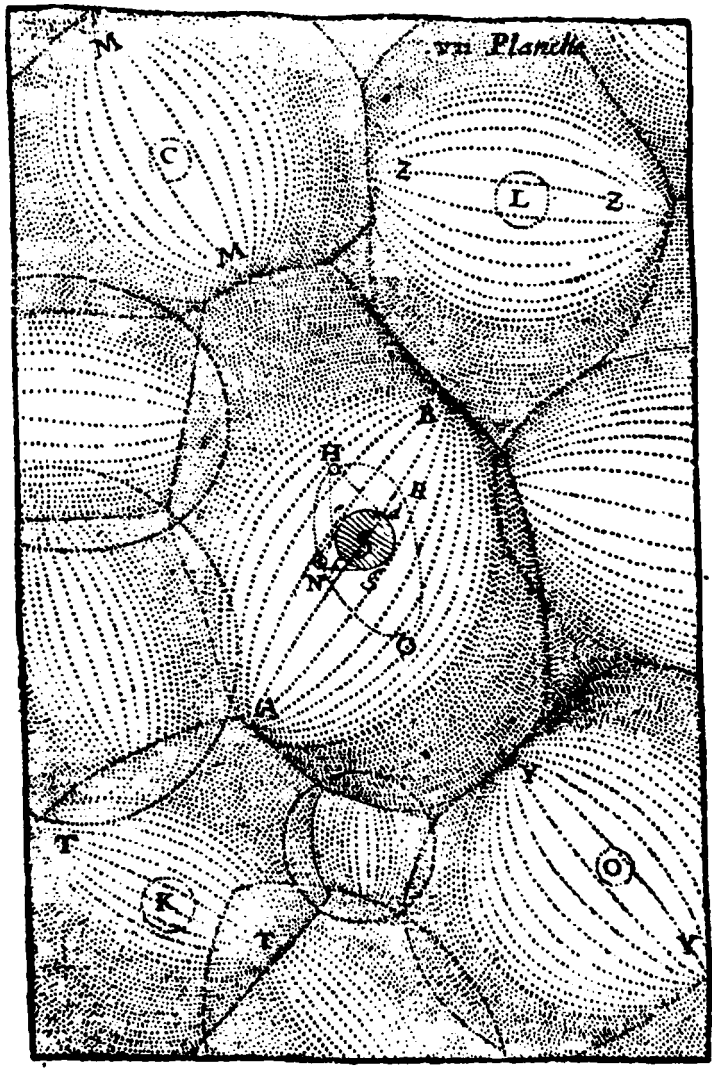


Figura 5.11.

Basta también considerarlos como centros de pequeños subvórtices para dar cuenta de sus rotaciones y sistemas de satélites. Estas circulaciones de fluidos pueden dar cuenta por contacto mecánico de misteriosas interacciones a distancia, como la gravedad que el propio Galileo había rehusado explicar. Cualesquiera otros fenómenos problemáticos pueden tornarse claros y transparentes postulando fluidos especiales de partículas con características geométricas adecuadas.

Por ejemplo, las partículas del primer elemento que entran por los polos del vórtice poseen una forma triangular para pasar por los huecos formados por tres partículas redondas de éter y, al girar, adoptan la forma de una especie de rosca, de manera que sólo pueden entrar por un polo, ya que tienen lateralidad (figura 5.12.). Ello puede explicar el magnetismo terrestre no menos que el de los imanes, tal como se hace en la Parte cuarta y última sobre nuestro mundo. Si ponemos una circulación de partículas en forma de rosca que entran por el polo norte del imán y salen por el sur, se explicará el fenómeno de la polaridad, así como la atracción y repulsión respectiva de polos diferentes e iguales. Si suponemos luego que el hierro posee poros con rosca, obtendremos una explicación mecánica del modelo mismo de la acción mágica a distancia: el magnetismo.

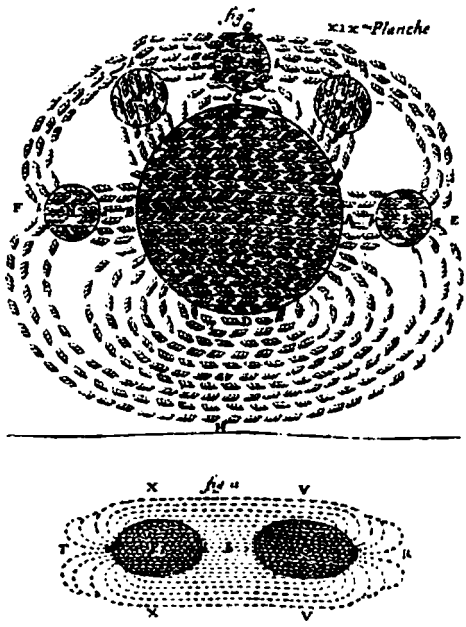


Figura 5.12.

La cantidad de fenómenos abordados de esta manera en la última parte es abrumadora, incluyendo el origen de la Tierra, de los océanos, de los ríos y las fuentes, las causas de la transparencia y la opacidad, del peso y la ligereza, de la luz y del calor. Incluye también la historia geológica, la formación de montañas, la atmósfera y los meteoros, el agua y las mareas, el calor subterráneo y los volcanes, etc. Todo ello sin lágrimas ni misterios, sino a base de partículas, movimientos, choques y presiones. Evidentemente todo era inventado y malamente podía funcionar, pero cautivó la imaginación de los científicos europeos y les enseñó a ingeniar mecanismos que pudiesen tratarse matemáticamente para la predicción cuantitativa de los fenómenos. Bien es verdad que muchísimas veces el cartesianismo se tomó como una disculpa para imaginar más que para construir modelos cuantitativos exactos y refutables, como reprochará Newton; pero otras muchas llevó a nuevas teorías matemáticas de la naturaleza, como en el caso de la química mecanicista, de la pneumática, de la óptica, o de las leyes de impactos, como iremos viendo en los capítulos siguientes.

Gracias a Descartes los restos del naturalismo renacentista desaparecieron, excepto en Cambridge, donde el neoplatonismo contó con un valedor

de la talla de Newton. Y a la larga mitigó también la ingerencia de la religión en la ciencia (salvo también entre los herejes de la pérfida Albión), pues el mundo estaba bien hecho y era autosuficiente, limitándose Dios a ser una pieza cosmológica inicial más que una entidad personal y moral, muy a la manera en que funcionaba el Dios de Aristóteles y en general el Dios de los filósofos. Y, para terminar, también como Aristóteles, produjo una filosofía, una ontología y un método que por primera vez desde la crisis del aristotelismo ofrecieron una visión general y omniabarcante de la naturaleza. Eso es así especialmente si se tiene en cuenta que Descartes extendió sus doctrinas mecánicas a la fisiología en el *Tratado del hombre*, y aún a la psicología en *Las pasiones del alma*, dando lugar a la imagen del hombre máquina que, me temo querido lector, todos nosotros somos.

6.

La síntesis newtoniana

6.1. El impacto

Lo que distingue a la dinámica de la cinemática es que en la primera se aborda el estudio de los movimientos a partir de las fuerzas que los originan o los alteran; la cinemática, por su parte, sólo se limita a la descripción de tales movimientos, prescindiendo de qué los haya producido.

La consideración de la fuerzas, o causas del movimiento, constituía un asunto difícil. Como vimos, Galileo tuvo que renunciar a la fundamentación dinámica de sus estudios sobre el movimiento. Descartes fue más radical, al desterrar de su física todo agente capaz de crear movimiento. El movimiento se conserva siempre; tan sólo se puede intercambiar. En su universo lleno de materia sólo actúan la presión y el impacto entre partículas, causas únicas e inteligibles de todos los fenómenos que, como el magnetismo, se habían venido considerando originados por oscuras actividades de la materia.

Así, las leyes del choque pasaban a ocupar un puesto destacado, pues gracias a ellas podrían conocerse, por lo menos en principio todos los cambios de la naturaleza. Y decimos en principio porque, tal como se mencionó en el Capítulo anterior, en un universo lleno los choques son innumerables e incesantes, tornando hasta tal punto compleja la indagación de los fenómenos a partir de sus causas, que ésta era inabordable. Lo único que se podía hacer era acometer el estudio de casos ideales, como el del choque de dos partículas aisladas de todas las demás (lo que quiere decir lo mismo que en el vacío). Esto conducía a una física que podía explicar de modo bien

inteligible las causas de un fenómeno a través del mecanismo que lo producía, pero que difícilmente podía abordar su estudio cuantitativo.

Las reglas de Descartes sobre el choque pueden resumirse así: en virtud de su tamaño y velocidad, los cuerpos tienen una «fuerza», una cierta capacidad de actuar unos sobre otros. La medida de esta «fuerza» podía efectuarse mediante el principio de conservación de la cantidad de movimiento; cuando dos cuerpos chocan, su cantidad de movimiento global, antes y después del choque, debe ser la misma. Así, si dos cuerpos iguales A y B chocan frontalmente con velocidades iguales y opuestas, rebotarán ambos con las mismas velocidades iniciales; si A se mueve más rápido que B, entonces después del choque los dos cuerpos se moverán juntos, habiendo cedido A a B algo de su velocidad; si A es mayor que B y está en reposo, B rebotará sin comunicarle nada de su movimiento, etc.

A pesar de que, salvo en el primer caso mencionado, estas leyes no se cumplan en la realidad, Descartes defendía su certeza. De hecho, casos como éstos no podían darse en su universo, pues en él no existía el vacío. Y en tal caso (que sería el de un cuerpo flotando en un fluido) el mismo Descartes afirmaba que estas leyes no se cumplían: un cuerpo pequeño podía golpear a otro mayor y ponerlo en movimiento, aunque su velocidad fuese pequeña.

Las insuficiencias del estudio cartesiano de las leyes del impacto iban a ponerse de manifiesto poco después, de la mano de Christiaan Huygens. Los dos principios establecidos por Descartes, el de la relatividad del movimiento y el de su conservación, eran incompatibles. Definiéndose la cantidad de movimiento como el producto del tamaño de un cuerpo por su velocidad, era siempre una cantidad positiva. Y como tal no se conservaba cuando el choque se observaba desde distintos sistemas de referencia (pues en algunos uno o ambos cuerpos invertían el sentido de su movimiento, y en otros no). Además, desde distintos sistemas se observaban distintas transferencias de movimiento entre los dos cuerpos. Huygens formuló nuevas leyes de impacto más acordes con los resultados experimentales, y aplicó al problema un principio establecido por Evangelista Torricelli, uno de los discípulos de Galileo. Torricelli había encontrado, estudiando el caso de los movimientos verticales, que dos cuerpos unidos entre sí sólo podían moverse si su centro de gravedad descendía. Así sucedía, por ejemplo, en el caso de dos graves unidos por una cuerda y suspendidos de una polea; el más pesado descendía, elevando al más ligero, porque asimismo descendía el centro de gravedad de ambos.

Huygens aplicó esta idea a los choques. El centro de gravedad del sistema formado por dos o más cuerpos que chocan no altera su estado de reposo o de movimiento rectilíneo y uniforme. Era precisamente el sistema de referencia en el que el centro de gravedad se hallaba en reposo aquél

para el cual siempre se cumplía la conservación de la cantidad de movimiento. Halló, sin embargo, otra cantidad que sí se conservaba en todos los casos: la suma de los productos de la magnitud de cada cuerpo por el cuadrado de su velocidad era la misma antes y después del choque, independientemente del sistema de referencia desde el que se observase. Tal cantidad, sin embargo, no pasaba entonces de ser un simple número, desprovisto de significado físico concreto.

Las aportaciones de Huygens al estudio de los choques desplazaron el tratamiento dinámico de las fuerzas implicadas al estudio puramente cinemático de las situaciones antes y después del impacto. El intento de constituir el impacto en un modelo de acción dinámica que permitiese la medida de las fuerzas se veía así bloqueado en la física cartesiana. La solución, como veremos, vendría por otro lado.

6.2. El análisis del movimiento circular

Otra importante aportación de Huygens al desarrollo de la mecánica del seiscientos fue su análisis del movimiento circular. Como se vio, para Descartes todo cuerpo tendía siempre a moverse en línea recta, a menos que la acción de otro cuerpo lo desviase de su camino. En realidad, en su universo lleno de materia, un cuerpo no podía seguir una trayectoria recta; los incesantes choques con la materia adyacente lo obligaban constantemente a desviarse, describiendo una trayectoria curva cerrada.

En el caso del movimiento circular (piénsese, por ejemplo, en un peso atado al extremo de una cuerda, que hacemos girar), el cuerpo tenderá, en cada punto, a seguir una trayectoria rectilínea por la tangente a la circunferencia. Esta tendencia se manifiesta como una fuerza hacia afuera que tensa la cuerda, la cual transmite esta tensión hasta la mano. Mediante consideraciones geométricas, Huygens halló que esta fuerza aumentaba proporcionalmente a la magnitud del cuerpo, al radio de la circunferencia descrita y también al cuadrado de su velocidad de giro.

Anacrónicamente, esto se puede escribir como:

$$F = mrw^2 = mv^2 / r$$

en donde w es la velocidad angular, v es la velocidad lineal, r el radio de la circunferencia y m la masa del cuerpo. En realidad, el concepto de masa tal como lo conocemos no se había definido, por lo que habría que hablar más bien de «cantidad de materia», y la fuerza centrífuga F no era, para Huygens, precisamente una «fuerza» sino que, análogamente al peso, constituía una tendencia («conatus» fue el término que empleó) propia del movimiento circular.

6.3. Las leyes de Newton

El sugestivo sistema de física de Descartes, basado en el mecanicismo, había venido a reemplazar completamente al antiguo sistema aristotélico. Las dificultades de este sistema, sin embargo, eran notables. Si suministraba un completo marco conceptual para la explicación causal de todos los fenómenos, tales explicaciones, en último extremo, se resistían a la cuantificación, por lo que en la mayoría de los casos no resultaban predictivas, y por consiguiente contrastables. Parecía, de todos modos, que la labor paciente de los cartesianos podría enmendar esto con el tiempo, tal como había hecho Huygens con las leyes del impacto.

Pero, como se apuntaba al final del Capítulo anterior, no todos, y menos los neoplatónicos de Cambridge, estaban de acuerdo con Descartes. Allí desarrollaría su obra Isaac Newton, el fundador de la mecánica moderna.

6.3.1. Las primeras investigaciones sobre el impacto y el movimiento circular

En 1665 todavía no se habían publicado los trabajos de Huygens sobre el choque. Fue este año cuando Newton acometió, al igual que Huygens, una nueva aproximación al problema del impacto. Sus caminos fueron, sin embargo, bien distintos, pues si Huygens había eliminado la espinosa intervención de la «fuerza» de actuación de un cuerpo sobre otro reduciendo el choque a la cinemática, Newton, por el contrario, abordará directamente la cuestión de la fuerza.

Al igual que Huygens, Newton encuentra un sistema privilegiado para el estudio de los choques en el del centro de gravedad. Con respecto a este centro de gravedad ambos cuerpos, si están en movimiento uniforme, tienen la misma cantidad de movimiento. En un sistema en el que este centro de gravedad está en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme, afirma, cada cuerpo al chocar actúa igualmente sobre el otro, con la misma fuerza, produciéndose iguales cambios en la cantidad del movimiento, pues en otro caso se alteraría el estado de reposo o movimiento uniforme de su centro de gravedad común.

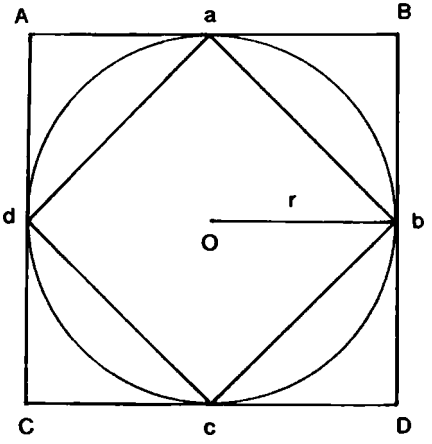


Figura 6.1.

En el caso del análisis del movimiento circular usó las leyes del impacto. En la figura 6.1., la trayectoria circular está inscrita en un cuadrado ABCD. Olvidémonos por ahora del círculo e imaginemos una bola que choca elásticamente con las caras del cuadrado, describiendo una trayectoria abcd. En un choque de este tipo, la bola mantiene intacta la componente de su movimiento paralela a la pared, e invierte la componente perpendicular. Se puede considerar uno de los lados del cuadrado pequeño, digamos el cb, como una medida de la velocidad de la bola. En tal caso el doble de la mitad del lado del cuadrado mayor, cD, mide la componente normal. Newton razona entonces que la fuerza que obliga al rebote de la bola es a la fuerza de su movimiento como scD es a cb o, lo que es lo mismo, como cb s a cD. Dado que en un circuito completo hay cuatro rebotes, la relación de fuerzas global es 4cb / cD, es decir, la longitud total de la trayectoria (el cuadrado pequeño), partida por el radio. Si sustituimos ahora los cuadrados inscrito y circunscrito a la trayectoria circular por polígonos con cada vez más lados, esta relación se mantiene, así como en el caso límite de un infinito número de lados, en el que ambos polígonos se confunden con el círculo. De modo que la fuerza F que obliga a la bola a describir la trayectoria circular es a la fuerza de su movimiento como $2\pi r r$, o sea 2π. Si, anacrónicamente, tomamos el producto de la masa por la velocidad mv como valor de esta fuerza del movimiento (pues la masa no estaba todavía definida), tenemos que $F / mv = 2\pi$ o $F = 2\pi mv$. Dado que esta fuerza se ha calculado para una revolución completa, hay que dividir la expresión anterior por la duración $t = 2\pi r / v$ de esta revolución, con la que pueda la conocida expresión $F = mv^2 / r$, obtenida independientemente de Hygens, y a la que éste denominó fuerza centrífuga.

Como se puede apreciar, Newton parte de la física cartesiana, pero se va separando decididamente de ella.

6.3.2. Los Principia

Una veintena de años más tarde, en 1687, se publicaba su obra cumbre, los *Philosophiae naturalis principia mathematica*, en donde la dinámica esbozada en el apartado anterior se había concretado en una disciplina axiomatizada. La obra comenzaba por un conjunto de definiciones, seguidas por tres leyes que vinieron a constituir la síntesis y solución de todos los esfuerzos anteriores por edificar una ciencia de la dinámica. Estas leyes eran las siguientes:

1. Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser en tanto que sea obligado por fuerzas impresas a cambiar su estado.

2. El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime.
3. Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: O sea, las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en direcciones opuestas.

La primera de estas tres leyes enuncia lo que hoy conocemos como principio de inercia, que ya hemos encontrado apuntado en Galileo y Descartes. En él se resuelven las dificultades que, para la formulación de una dinámica cuantitativa, habían presidido estos intentos anteriores. Como se vio, Galileo afirmaba que si un cuerpo se halla en reposo en un plano «horizontal» (y decimos «horizontal» porque, en realidad, se trata de una superficie esférica concéntrica con la de la Tierra) y se le aplica un cierto impulso, adquirirá un movimiento uniforme que persistirá indefinidamente. Pues este movimiento circular mantiene el orden existente, en el sentido de que ni acerca ni aleja al cuerpo de su lugar natural. Para Descartes, sin embargo, la materia es absolutamente indiferente al reposo o al movimiento. De hecho, dado que el movimiento de un cuerpo es un concepto relativo a otros cuerpos de su vecindad, es imposible distinguirlo del reposo: todo dependerá del sistema de referencia desde el que se observe. La materia tampoco posee ningún tipo de tendencia natural: los cuerpos se mueven en línea recta hasta que tropiezan con otro. Entonces tiene lugar una transferencia de movimiento que modifica su estado.

Newton, en cambio, trascenderá esta indiferencia de la materia afirmando que en ella hay algo que se opone a que se varíe su condición. Reside en ella una «fuerza insita», a la que define como «una capacidad de resistir por la que cualquier cuerpo, por cuanto de él depende, persevera en su estado de reposo o movimiento rectilíneo y uniforme». Esta capacidad es proporcional a la cantidad de materia del cuerpo por lo que, cuanto mayor sea dicha cantidad, mayor deberá ser también la fuerza impresa necesaria para producir un cambio dado en su estado de reposo o movimiento.

Esta cantidad de materia, hasta la fecha definida ambiguamente como a través de la «magnitud» o «voluminosidad» del cuerpo, conceptos desde luego intuitivamente asociados con su peso, se concreta ahora como «la medida de la misma originada de su densidad y volumen conjuntamente».

Un punto débil de la física cartesiana era que, siendo la materia totalmente indiferente, cualquier acción podría producir cualquier efecto. Pero no sucede lo mismo cuando le damos un papirotazo a una mosca que cuando se lo damos a una roca de respetable tamaño. Algo distingue a la mosca de la roca que hace que el resultado sea bien distinto. Descartes explica vagamente la diferencia tanto por la distinta cantidad de materia de ambos como por la distinta extensión de sus superficies; para Newton, lo que sucede es que sus «fuerzas insitas», sus inercias, son diferentes.

La segunda ley afirma que el efecto de una fuerza exterior o impresa sobre un cuerpo es producir un *cambio* en su estado de reposo o de movimiento y no, como se había venido suponiendo, un movimiento. Y es este cambio producido bien en su velocidad, bien en su dirección o en ambas, lo que constituye la medida de la fuerza. Puesto que Newton define la cantidad de movimiento de un cuerpo como el producto de su cantidad de materia y de su velocidad, la segunda ley puede escribirse como

$$F = \Delta (mv)$$

Es esta una expresión algo distinta de la que hoy estamos acostumbrados a manejar:

$$F = ma$$

que establece la proporcionalidad, para un cuerpo de masa dada, entre la fuerza y la aceleración adquirida, es decir, entre la causa y su efecto. De hecho, las dos ecuaciones anteriores no son equivalentes. En la primera de ellas interviene lo que hoy llamamos *impulso*, que es, supuesta la fuerza constante, el producto de ésta por el tiempo durante el que actúa. Se trata de una ley derivada del modelo de impacto. El segundo tipo de ley, que establece la proporcionalidad entre fuerza y aceleración, se aplica cuando la fuerza actúa constante y uniformemente, como en el caso del movimiento circular. En el apartado anterior hemos visto cómo, en el análisis del movimiento circular, se obtiene una expresión para la fuerza centrífuga a partir del impacto que luego es preciso dividir por el período. Newton no llegó nunca a establecer una distinción clara entre ambas.

Finalmente, la tercera ley establece la necesaria igualdad entre la acción y la reacción. Cuando un cuerpo A ejerce una acción sobre otro B (cuando arrastramos un sofá, por ejemplo), dicha acción se ve acompañada de una reacción igual y opuesta de B sobre A (y tal reacción se hace notar mediante el empuje que sufrimos en la mano que arrastra al sofá). La reacción, evidentemente, es una consecuencia de la inercia del cuerpo B a alterar su estado. Nótese que este principio ya se había intuido en el tratamiento del choque comentado en el apartado anterior, cuando se afirma que ambos cuerpos interactúan con la misma fuerza.

Como vemos, Newton ha introducido dos tipos distintos de fuerzas y posibilitado su cuantificación. Una es la fuerza innata de la inercia; la otra, la fuerza impresa que modifica el estado del cuerpo. La ley de la inercia ya estaba definida en Descartes; pero no era operativa, en tanto en cuanto no había forma de medir esta inercia; en cuanto a la fuerza impresa, ha sufrido una transformación radical. En el seiscientos se tendía a pensar en la fuerza como una propiedad asociada al movimiento de los cuerpos; ahora Newton otorga a la fuerza un status independiente al considerarla una acción externa a los cuerpos. Ello es consecuencia de un fructífero desplazamiento

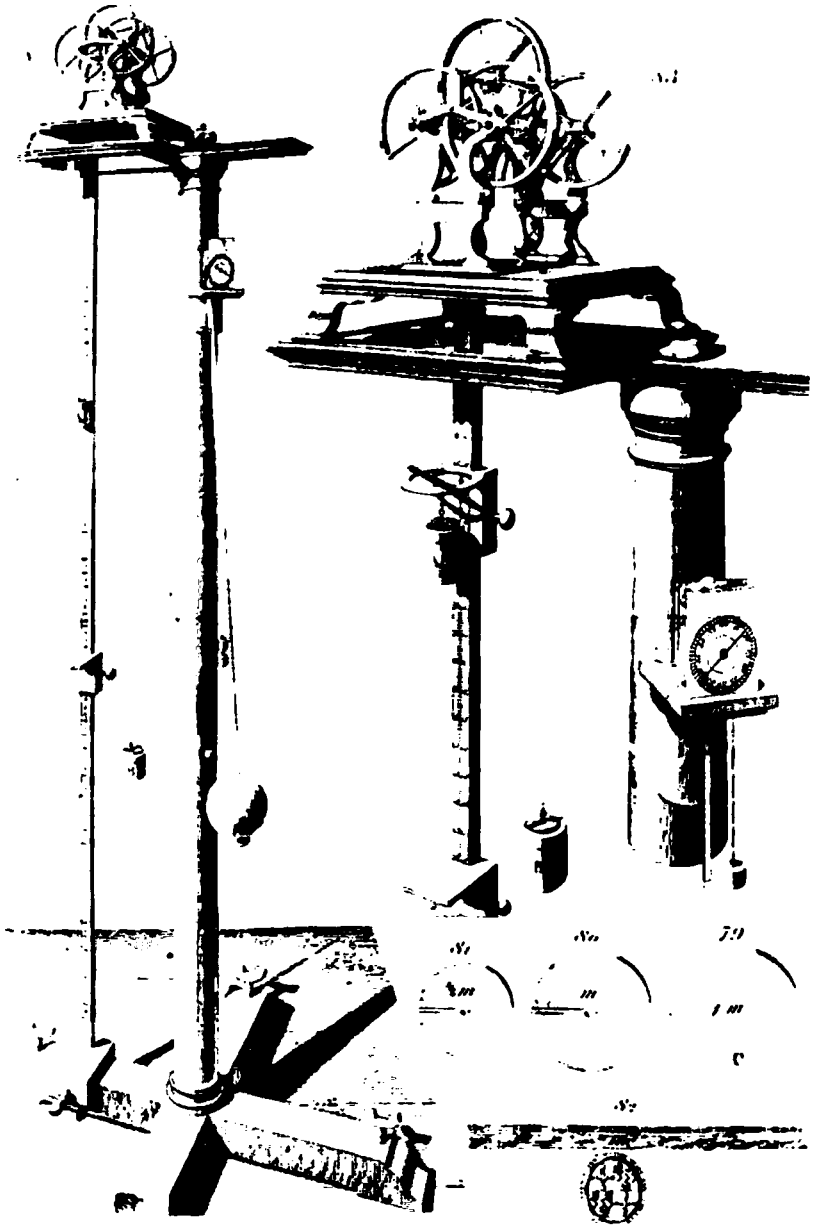


Figura 6.2. Máquina descrita por George Atwood, en su *Treatise on the Rectilinear Motion and Rotation of Bodies* (1748), para demostrar la segunda ley de Newton. Esto se hacía variando la masa de una de las dos pesas conectadas entre sí, y midiendo las correspondientes diferencias en la velocidad de descenso, que con este dispositivo es mucho menor que la de caída libre.

del punto de vista desde la consideración del cuerpo que actúa a la del cuerpo sobre el que se actúa.

Junto a las tres leyes, Newton alinea una concepción absoluta del espacio y del tiempo. Descartes refería el movimiento de un cuerpo a su cambio de posición respecto de otros cuerpos vecinos; de este modo, el movimiento se tornaba tan relativo que, para Newton, llegaba a perder sentido la misma idea de velocidad. Este, en cambio, rechazaba como buen atomista la identificación de la extensión y la materia, y creía en la existencia de un sistema de referencia privilegiado, el espacio absoluto, junto al que alineaba un tiempo igualmente absoluto. Para Newton, es en tal espacio absoluto donde tienen lugar los movimientos absolutos descritos por sus leyes, en donde los cuerpos sólo cambian su estado por la acción de fuerzas impresas. No sucede así en el movimiento relativo, que se define respecto a un sistema de referencia sensible. Supongamos que un cuerpo se observa en reposo desde un sistema definido por unos determinados objetos; si ahora se imprime una fuerza a estos objetos, desde los mismos se verá al cuerpo iniciar un movimiento acelerado, pese a que no se observará que se le haya aplicado fuerza alguna.

El espacio absoluto es indiscernible, por medios mecánicos, de cualquier sistema de referencia que se mueva con velocidad uniforme respecto de él; esto constituye el principio de relatividad que ya apuntara Galileo. Sin embargo, en ciertos casos, los movimientos absolutos pueden distinguirse de los relativos. Según Newton, en el caso del movimiento circular, esto se puede lograr por medio de la fuerza; si el movimiento circular es meramente relativo, no aparecerá ninguna tendencia centrífuga. Supongamos con él un gran espacio vacío, en el que ponemos dos esferas unidas por una cuerda, haciéndolas girar en torno a su centro de masas común. Ahora coloquemos en dicho espacio una media docena de estrellas fijas. A partir del movimiento relativo es imposible discernir si lo que gira son las esferas o las estrellas. Si, en cambio, se atiende a la cuerda que une a aquéllas, su estado de tensión mostrará la tendencia centrífuga de las mismas a consecuencia de su movimiento absoluto de giro. Lo mismo pasa con nuestro planeta: la tendencia centrífuga pone de manifiesto que es la Tierra, y no la esfera de las fijas, quien gira todos los días sobre su eje.

6.4. La atracción universal

Como se vio más arriba, el estudio del movimiento circular de Huygens puso de manifiesto la existencia de una fuerza centrífuga proporcional a v^2 / r, en donde r es el radio del círculo y v la velocidad con que se recorre su circunferencia. La tercera ley de Kepler, por su parte, afirmaba que en los movimientos planetarios r^3 / T^2 es constante para cada planeta, siendo T el período de revolución. Combinando ambas expresiones era sencillo llegar a

la conclusión de que, para los planetas, la fuerza centrífuga es proporcional a $1/r^2$. Como $v = 2\pi r/T$, se tiene que $v^2 \propto r^2/T^2$, de modo que:

$$F \propto (v^2/r) \propto (r/T^2) \propto (1/r^2)(r^3/T^2) \propto (1/r^2)$$

El problema estaba en que los planetas no siguen trayectorias circulares, por más que se aproximen a ellas, sino elípticas.

Todo este análisis se fundaba en las ideas de Descartes, quien había imaginado a los planetas arrastrados en torno al Sol por grandes vórtices de materia. Su tendencia a un movimiento rectilíneo, manifestada como una suerte de fuerza centrífuga, se veía constantemente frustrada desde la periferia del vórtice. Pues, siendo el universo un plenum, para que el planeta, siguiendo esta tendencia, se alejase del Sol, era preciso que otra materia en la periferia de su órbita, viniese a ocupar su lugar; pero esta materia se oponía a hacerlo, dado que también tiene su propia tendencia centrífuga, alcanzándose así una situación de equilibrio.

Robert Hooke fue uno de los que se ocuparon de este problema, planteándolo en los términos apropiados para su resolución. Creía que la cuestión podría resolverse descomponiendo el movimiento orbital en otros dos, uno de caída hacia el centro de la órbita y otro según la tangente. Observemos la diferencia con el análisis del movimiento circular de Huygens: Hooke habla, no de una tendencia centrífuga, sino de un movimiento acelerado de caída provocado por una fuerza dirigida hacia el centro, tal como la había imaginado Gilbert. No pudo dar con la solución pero, en su corres-

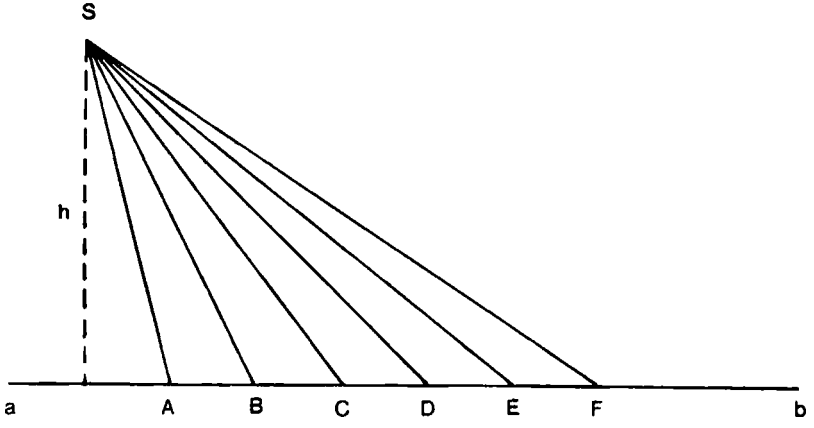


Figura 6.3. Supongamos un cuerpo que se mueve sobre la recta ab con velocidad constante; por consiguiente recorre espacios iguales AB, BC, CD, etc. en intervalos de tiempo iguales. Tomemos un punto cualquiera S exterior a la trayectoria. Se ve que respecto al mismo se cumple la ley de las áreas, pues los sucesivos triángulos SAB, SBC, SCD, etc. tienen todos la misma área, al tener todos bases iguales y la misma altura.

pondencia con Newton, retó a éste a fines de 1679 a hallar la trayectoria de un cuerpo sometido a una fuerza atractiva central cuya intensidad decreciese con el cuadrado de la distancia mediante la descomposición en los dos movimientos anteriores.

Newton dio con la solución, pero no la publicó; ésta aparecería por primera vez en los *Principia*. No entraremos en detalles, tan sólo apuntaremos el procedimiento seguido. Considera en primer lugar (figura 6.3.) un movimiento inercial y rectilíneo, y muestra que respecto a un punto exterior P se cumple la ley de las áreas. Sobre este movimiento superpone la actuación de fuerza atractiva como una sucesión de «golpes» instantáneos aplicados al cuerpo a intervalos regulares (nótese la aplicación del modelo del impacto) y dirigidos hacia el punto central (figura 6.4.). Con cada golpe, el cuerpo cambia de dirección, siguiendo una trayectoria poligonal en torno al centro para la que, en cada uno de sus tramos, Newton demuestra que se cumple, respecto de dicho centro, la ley de las áreas enunciada por Kepler. Si ahora se reduce hasta el límite el intervalo entre cada golpe, la ley de las áreas sigue cumpliéndose y se llega al caso de una fuerza continua que actúa constantemente. A la inversa, también demuestra que, si un cuerpo se mueve de acuerdo con la ley de las áreas, entonces la fuerza debe dirigirse constantemente hacia el centro. Finalmente demuestra que, si la órbita es una elipse, la fuerza, dirigida hacia el foco, debe variar inversamente al cuadrado de la distancia. A esta fuerza la llamará centripeta, pues es diametralmente opuesta a la fuerza centrífuga de Huygens la cual, por lo demás, no es una verdadera

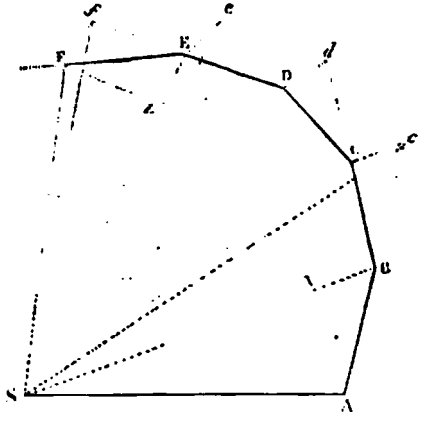


Figura 6.4. Si sobre la trayectoria de la figura 2 superponemos la fuerza atractiva hacia S como una serie de impulsos instantáneos impresos en A, B, C, D,... y dirigidos hacia S, el cuerpo se moverá siguiendo una línea poligonal. Con el impulso aplicado en B, recorrerá en la unidad de tiempo el tramo BC: si este impulso no se hubiese aplicado, habría recorrido el Bc, de igual longitud. Los triángulos SBC y SBc, según demuestra geométricamente Newton, tienen la misma área. Lo mismo se cumple para los demás segmentos de la trayectoria.

fuerza, sino que se explica como un efecto de la inercia del cuerpo a seguir moviéndose por la tangente.

Las leyes de Kepler, hasta el momento simples leyes empíricas, y no por todos aceptadas e incluso conocidas, encontraron su fundamentación en la dinámica newtoniana. Pero era preciso ir más lejos. Según la ley de la acción y la reacción, si el Sol ejerce una acción sobre la Tierra que produce su movimiento orbital, también la Tierra debe ejercer una reacción igual y opuesta sobre el Sol; de modo que, en realidad, los dos cuerpos girarán en torno a su centro de masas común. Dada la gran masa solar en comparación con la terrestre, se comprende que el movimiento de aquél sea inapreciable. Todavía más, lo mismo sucede en el caso de los demás planetas, e incluso en el sistema formado por un planeta y sus satélites. De modo que cada cuerpo interactúa con los demás del Sistema Solar, y el simple caso de un solo planeta moviéndose en torno al Sol se ve complicado por la presencia de fuerzas perturbadoras procedentes de los demás. Ello dará cuenta de las variaciones de las órbitas detectadas por los astrónomos; el problema matemático resultante era —y lo sigue siendo— enormemente complicado, y daría nacimiento a toda una disciplina, la mecánica celeste, que se desarrollaría rápidamente, al compás de los avances en matemáticas, en la segunda mitad del siglo XVIII.

Volvamos a Newton. Hacia 1665, Newton combinó la expresión de la fuerza centrífuga con la tercera ley de Kepler, obteniendo una fuerza inversa del cuadrado de la distancia. En ese momento todavía no se había perfilado su pensamiento; creía, bajo la influencia cartesiana, en la existencia de un conatus o tendencia centrífuga de los cuerpos que describen una trayectoria circular. Un par de años después comparó este conatus motivado por la rotación diurna de la Tierra con la gravedad en el ecuador, estableciendo que la gravedad predominaba grandemente sobre el conatus. Luego comparó el valor del conatus en el ecuador con el obtenido en el caso de la Luna; el resultado fue que la fuerza de gravedad era muy superior al conatus. Como vemos, Newton todavía no pensaba en términos de una fuerza centrípeta, ni tampoco se le había ocurrido extender la influencia de la gravedad hasta la Luna, comparando los valores de la atracción en ésta y sobre la superficie de la Tierra. De hecho, adoptó un valor erróneo para el radio ecuatorial de la Tierra. Más tarde, el propio Newton quiso hacer creer a todo el mundo que en estos cálculos se encerraba la prueba de la gravitación universal; sin embargo, faltaban todavía veinte años para la publicación de los Principia, y Newton se hallaba aún lejos de concebirla.

Fue más tarde, establecida la existencia entre los astros del Sistema Solar de una fuerza centrípeta que decrece como el cuadrado de la distancia, y que además, como también demostró, es proporcional a su masa, cuando dirigió su atención al caso de la gravedad. La gran síntesis consistió en asimilar la fuerza que causa la caída de los graves sobre la superficie de la Tie-

rra a esa otra fuerza atractiva que opera entre los planetas. Newton había probado que, en el caso de éstos (una gran masa esférica), la fuerza se ejerce como si toda su masa estuviese concentrada en su centro geométrico. Tomemos, pues, el centro de la Tierra, y consideremos a la Luna, que se encuentra a 60 radios terrestres de distancia. Si conocemos la aceleración producida por la fuerza de atracción terrestre en la superficie, a un radio del centro, podremos encontrar la que se produciría a 60 radios, pues ésta, de acuerdo con la ley de la inversa del cuadrado, deberá ser $1 / (60)^2 = 1 / 3600$ veces menor. Esta sería la aceleración de caída de la Luna hacia la Tierra que, dada su velocidad lineal, produce su movimiento de giro en torno a la misma. El movimiento lunar así predicho coincidió bastante bien con el realmente observado.

La misma causa, pues, se halla tras la caída de, digamos, una manzana y la caída de la Luna. Existe una atracción universal entre cada dos cuerpos que es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa:

$$F \propto Mm / r^2$$

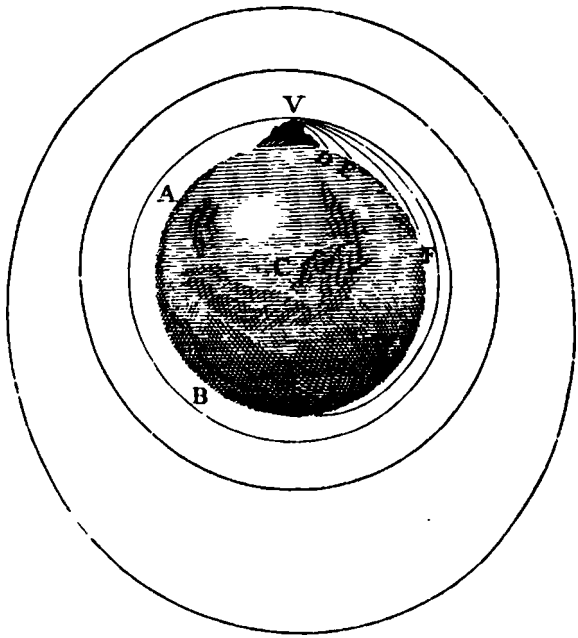


Figura 6.5. El lanzamiento de un satélite artificial. Tal como muestra Newton en su *De mundi systemate* (1728), si desde una altura muy elevada se lanzan paralelamente al suelo distintos proyectiles con velocidades crecientes, finalmente se dará el caso de que se muevan describiendo órbitas en torno a la Tierra.

De acuerdo con Newton, esta fuerza de gravitación es la que da cuenta tanto del movimiento lunar como de la caída de un grave sobre la superficie terrestre. En este caso, de acuerdo con la segunda ley:

$$F = ma$$

o, si se quiere:

$$P = mg$$

donde P es el peso, g la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre, y m la masa de la manzana. ¿Pero se trata de la misma masa en los dos casos? La masa de la segunda ley es una masa inercial m_i, que mide la resistencia de la manzana a cambiar su estado de reposo o movimiento bajo la acción del peso. La masa gravitatoria m_g de la manzana es algo distinto: está relacionada con su capacidad de ser atraída por (y de atraer a) la Tierra. Mediante algunos experimentos realizados con péndulos, en los que no entraremos, Newton concluyó que ambas masas eran equivalentes.

La masa pasa así en la mecánica newtoniana a sustituir al peso como noción básica. Pues el peso es una noción relativa que, como muestra la expresión para F_g, depende de la distancia al centro y de la masa del cuerpo celeste que se considere: algo que nuestros astronautas comprobaron cuando se dieron una vuelta por la Luna.

Como corolario, es fácil deducir de aquí que todos los cuerpos, independientemente de su masa, caen en la superficie de la Tierra con la misma aceleración. Pues haciendo $F_g = P$ y cancelando las masas en ambos miembros de la ecuación, resulta que:

$$g \propto M / r^2$$

6.5. El programa newtoniano

La a veces llamada síntesis newtoniana (aunque, por otra parte, fue bastante original) constituyó, más que una obra acabada, todo un programa de indagación legado a la posteridad. Newton señaló el método y las leyes básicas, mostrando algunas de sus aplicaciones. Los *Principia* comienzan con una serie de definiciones y el enunciado de sus leyes del movimiento, seguidas por tres partes o Libros: el primero, «Del movimiento de los cuerpos», aplica sobre todo estas leyes al movimiento de masas puntuales en el vacío sometidas a fuerzas centrales; en el segundo, bajo el mismo título, intenta aplicar sus leyes a campos menos trillados, como eran los movimientos en medios resistentes y la mecánica de fluidos; finalmente, en el tercero, «Sobre el sistema del mundo», expone la ley de la gravitación universal y estudia a su luz las características de las órbitas elípticas resultantes apuntando sus

perturbaciones. Dentro de esto, se detiene en el análisis de nuestro satélite, que gira en torno a la Tierra con un movimiento perturbado por la atracción solar; consigue aquí explicar muchas cosas, pero el problema seguía siendo demasiado complejo como para que alcanzase un éxito total. También estudió la figura de los planetas, achatada en torno a los polos a causa de su movimiento de rotación, que daba cuenta de la variación de la aceleración de la gravedad con la latitud. Explicó el fenómeno de las mareas como resultado de la atracción combinada del Sol y de la Luna sobre la masa de los océanos. Y abordó el estudio de los cometas como cuerpos que, sometidos a la gravitación solar, describían órbitas elípticas muy excéntricas. Aunque, mencionado así de pasada, no parezca gran cosa, fueron aportaciones de gran significación. Una versión, más aligerada matemáticamente, de esta última parte sería publicada póstumamente en 1728 con el título de *De mundi systemate.*

El método empleado por Newton para la resolución de los distintos problemas estudiados en los *Principia* consistía en la elaboración de modelos matemáticos altamente simplificados (de ahí el título de la obra, «Principios matemáticos de filosofía natural»). En el caso del movimiento planetario, por ejemplo, se recogen en el Libro I una serie de construcciones puramente matemáticas; en una se considera una masa puntual idealizada (sin dimensiones), sometida a una fuerza central que está dirigida a un punto geométrico. En construcciones sucesivas se introducen complicaciones adicionales: por ejemplo, el punto matemático al que se dirige la fuerza se convierte en otra masa puntual; luego se introduce la consideración de fuerzas perturbadoras originadas por otras masas puntuales, etc.

El Libro III es de índole bien distinta. Al principio recoge una serie de fenómenos, de datos de observación, sobre los movimientos del Sistema Solar; a éstos sigue otra serie de Proposiociones. En ellas se explican los fenómenos invocando las demostraciones matemáticas de los Libros anteriores, mostrándose el acuerdo de las cifras deducidas de sus modelos con los datos de la observación.

Evidentemente, la construcción de modelos matemáticos gradualmente más complicados estaba guiada (aunque esto no se evidenciase en los *Principia*) por la consideración de la constitución física real del sistema que pretendía analizar. Pero, tratándose de constructos matemáticos, Newton podía permitirse el lujo de entrar en consideraciones que en otro contexto hubieran resultado absurdas, como es el caso de las fuerzas de gravitación actuando a distancia. El buen resultado final del Libro III es que, se quiera o no, las matemáticas demuestran que estas fuerzas están actuando. Desde luego, ni tan siquiera el mismo Newton está convencido de que algo pueda actuar allí donde no está. Así que deja abierta la cuestión de su causa, bien resida ésta en algún tipo de mecanismo al uso o en cualquier otra cosa. (Esto, con ser muy bonito, no pasa con todo de ser una mera presentación

pública elaborada para no complicarse la vida; lo veremos en el apartado siguiente).

Junto a esto, todavía se debe a Newton la invención del cálculo infinitesimal, que elaboró independientemente de Leibniz. Gracias al mismo, las matemáticas pudieron avanzar lo suficiente como para abordar las múltiples aplicaciones que su mecánica dejó planteadas.

6.6. La otra cara del programa newtoniano y el fin del mecanicismo

Al lado del aséptico programa recogido en los *Principia*, y a pesar de todos sus escrúpulos por no tramar hipótesis, Newton dejó un panorama algo liado. Sus estudios sobre la naturaleza de la luz, recogidos en su *Optica* de 1706, apuntaban en una dirección bastante distinta. Los *Principia*, por más que dejaran mucha tarea para hacer, constituían una obra acabada y, por decirlo así, perfecta; la *Optica*, sin embargo, enraizada antes en la experiencia que en las matemáticas, respondía más a los nuevos ideales de las ciencias experimentales y recorría caminos mucho más aventurados. No entraremos ahora en su descripción, pues es tema que se reserva para el Capítulo siguiente. No podemos eludir, sin embargo, algún comentario acerca de la concepción del mundo que se esconde tras la obra de Newton, y que en cierta medida se sugiere en una serie de «cuestiones» al final de la *Optica*.

La síntesis newtoniana vino a perturbar bastante la filosofía mecanicista en la que el propio Newton se había apoyado. He aquí que ésta había surgido como una respuesta racional al mundo permeado de acciones animistas del Renacimiento: según los nuevos filósofos, en el mundo no había otra cosa que materia pasiva y movimiento. Pero ahora Newton alineaba junto a ellas unas «fuerzas» que nadie sabía bien qué eran, por más que se pudiesen medir por sus efectos, y activaba en cierto modo a la materia dotándola no sólo de una «fuerza ínsita» para oponerse a los cambios de estado dinámico, sino también, lo que resultaba infinitamente peor, de una oscura capacidad de actuar a distancia.

Newton no fue, de todos modos, el único en subrayar la importancia de la fuerza. En 1686, un año antes de que aparecieran los *Principia*, Leibniz publicaba un trabajo en el que ponía de manifiesto las deficiencias de las concepciones cartesianas. Para él, constituía un craso error (y así lo demostraba) la identificación de la fuerza con la cantidad de movimiento. Su medida, argumentaba, estaba en esa cantidad que ya Huygens hallara analizando el problema de las colisiónes, el producto de la masa por el cuadrado de la velocidad. Así, la conservación del mundo implicaba, no la de la cantidad de movimiento, sino la de la fuerza de tal modo entendida, que

Leibniz denomina «vis viva» (en contraposición a las fuerzas estáticas, o fuerzas muertas). Tal definición, que puede ser considerada como un germen del princpio de conservación de la energía, no era de utilidad en la época para resolver los problemas dinámicos.

Junto a la vis viva, Leibniz alineaba un concepto de materia muy alejado de la pasividad cartesiana. El mecanismo macroscópico no tenía, para él, una contrapartida microscópica; al contrario, para él la materia es vital y activa, y precisamente la conservación de la vis viva expresa la eterna conservación de esa vitalidad en un mundo que considera el mejor de todos los posibles.

Newton, por su parte, trató de ser extremadamente cauteloso y, poco deseoso de polemizar (prefería que otros lo hiciesen por él, como su discípulo Clarke lo haría con Leibniz), subrayó el carácter operativo de las fuerzas de atracción. De ahí su famosa afirmación «hipótesis non fingo» (por más que en privado no dejase de hacerlo). Públicamente, la posición de Newton era que, desde luego, las fuerzas de atracción debían tener una causa; pero que, mientras ésta no se descubriese, había que conformarse, lo que no era poco, con un constructo matemático capaz de predecir con fidelidad las apariencias.

Si las ideas de Newton resultaban sospechosas en el continente, donde dominaba la filosofía cartesiana, ésta no lo resultaba menos en las islas británicas. El materialismo mecanicista de los cartesianos se veía como un billete (sólo de ida) para el infierno. Para éstos, Dios hizo tan bien las cosas que su posterior intervención en la creación ya no era necesaria; el papel divino se había reducido a un simple papirotazo inicial que lo puso todo en movimiento (y por consiguiente hasta el milagro quedaba excluído); de ahí a eliminarlo del todo afirmando la eternidad del mundo sólo había un paso que ya algunos habían dado.

Los neoplatónicos de Cambridge, por el contrario, creían en una presencia constante en el mundo de la providencia divina. Dios era la única fuente de actividad en cada fenómeno de la naturaleza. De hecho, como nada puede actuar allí donde no está, Dios debía hallarse presente por doquier, operando sobre el mundo, bien directamente, bien sirviéndose de algún tipo de agente o espíritu activo, como podría ser el caso de un éter, idea con la cual jugó Newton en determinados momentos.

Esta concepción del mundo era compartida (si no encabezada) por Newton. Si bien es imposible dar cuenta aquí de su periplo intelectual, su postura podría resumirse diciendo que para él, como buen atomista, la materia estaba formada por corpúsculos, indivisibles en última instancia, sólidos, masivos, duros, impenetrables y móviles. Tales partículas están dotadas de inercia y sometidas a sus leyes del movimiento. Y poseen, además, ciertos «principios activos», más o menos vinculados con la divinidad (en cualquier caso, no materiales), tales como el de la gravitación y los que

causan la cohesión y la fermentación de los cuerpos (entramos aquí en el campo de la química, que trataremos más adelante). Junto a la atracción de la gravedad, tales corpúsculos podrían poseer otras atracciones responsables de los efectos de la electricidad y del magnetismo. Atracciones que, desde luego, no tienen por qué cumplir la misma ley matemática que rige para el caso de la gravitación y cuyas causas son igualmente desconocidas. Junto a estas fuerzas atractivas, también podrían operar fuerzas repulsivas, entendidas como atracciones de signo negativo.

Pero volvamos a la famosa atracción. En 1744 sería publicada una carta de Newton dirigida a Robert Boyle, 65 años después de que fuese redactada. En ella Newton buscaba la explicación de la gravitación en la existencia y propiedades de un éter o sustancia sutil que permeaba todos los cuerpos. De modo que las nuevas ciencias experimentales encontraron dos vías para la indagación de los fenómenos, ambas sancionadas por la autoridad de Newton: por una parte, se podía pensar que cada partícula de materia actúa de acuerdo con ciertas leyes de fuerzas, que pueden cambiar de atractivas a repulsivas y variar su intensidad de acuerdo con la distancia; por otra, se podía suponer la existencia de fluidos sutiles, al estilo del éter concebido por Newton, portadores de propiedades físicas asociadas con los distintos fenómenos del calor, la electricidad, etc. Como se ve, un buen galimatías, pues la actividad de la materia, que al final Newton, quizás en el fondo para evitarse quebraderos de cabeza, acabó haciendo residir en la acción divina, quedaba ahora relegada, pero bien presente, en unos fluidos activos y sutiles cuyo papel será el de agentes capaces de iniciar en los cuerpos nuevos movimientos que éstos no podrían haber adquirido de otra manera.

De todos modos, el sistema newtoniano, tan cuidadosamente diseñado para salvar la intervención de la deidad, llevaba en sí el germen de su propia perdición. Las acciones a distancia, entendidas como propiedades esenciales de la materia (interpretación que Newton jamás sostuvo), permitían formular la imagen de un universo ordenado por sí mismo, ya no por azar, sino por la propia determinación de sus leyes. Entretanto, y salvando las diferencias entre Descartes y Leibniz, algunos matemáticos franceses, como Maupertuis, buscarían la presencia divina en unos principios de conservación y economía que podían poner de manifiesto el plan de Dios para con su creación.

7.

La matematización de la óptica física y la estructura de la materia

Hemos visto hasta ahora cómo una buena parte de la Revolución Científica, concretamente la conectada con la clave mecánica, arranca del esfuerzo copernicano de insuflar entidad física a las construcciones geométricas de los matemáticos. Eso llevó a Galileo a geometrizar el viejo problema del movimiento y a Descartes a proponer el programa de hacer otro tanto con cada parcela de la naturaleza, si bien el ejemplo más cumplido fue la mecánica newtoniana, donde una buena cantidad de cuestiones físicas se sistematizó deductivamente a partir de «principios matemáticos». Desde el siglo XVIII, la obra de Newton se convirtió en un ejemplo de cómo matematizar efectivamente y no ya programáticamente otras áreas naturales. Sin embargo, él mismo avanzó mucho más lejos que sus rivales hacia la matematización del viejo problema de la luz.

La óptica posee una tradición un tanto similar a la de la astronomía, pues del mismo modo que ésta andaba un tanto divorciada de la cosmología física, desde los tiempos de Euclides (siglo III a. C.), la óptica geométrica era un campo de investigación con problemas y técnicas relativamente independientes de la concepción física de la luz y de las teorías de la visión.

Y así como fueron los árabes los primeros en expresar el malestar por la separación entre física y astronomía, también ellos hicieron los mayores esfuerzos por conectar la óptica geométrica con una fisiología y una física aceptables. Sin embargo, hasta la filosofía mecánico-corpuscular, no se construyeron modelos físicos de la luz a partir de los que se pudieran derivar los teoremas del campo, como las leyes de refracción y reflexión.

7.1. Vuelta a los griegos

Como acerca de casi cualquier cosa, en Grecia encontramos opiniones para todos los gustos sobre la luz y la visión. Para algunos, la luz era una substancia, mientras que para otros era cierta alteración en un medio; y tanto unos como otros se dividían en quienes concebían esa substancia o alteración como algo objetivo o como algo engendrado por el sujeto. Los pitagóricos, por ejemplo, creían en la emanación desde el ojo de un fuego invisible que se proyectaba como rayos visuales sobre los objetos (ya se sabe que hay miradas que matan y ojos que encadenan). Por su parte, los atomistas pensaban que de los objetos emanaban sutiles capas de átomos, los simulacros, que viajaban hasta los ojos. Aristóteles discrepaba de unos y otros. ¿Qué les pasa a los pitagóricos que sus ojos no emiten de noche? ¿Y cómo cabe en la pupila de Demócrito el simulacro de un elefante o del monte Olimpo?

La teoría aristotélica afirma que la visión se debe a un estado mecánico, un movimiento excitado por los cuerpos visibles en el medio cuando la luz lo altera y transforma de opaco en diáfano. Asimismo Galeno sostiene una doctrina similar en la que la excitación del estado en cuestión está provocada por un espíritu visual procedente de los ojos que interacciona con la luz externa. Ambas teorías tenían sus propios problemas, como es la dificultad de explicar la transmisión rectilínea en medios continuos. Y, junto con la atomista, adolecían de la imposibilidad de dar cuenta del orden del campo visual. En efecto, si desde cualquier punto de la sala vemos en cuadro de las lanzas con caballos, lanzas, vencedores y vencidos es porque en todas partes están sus imágenes. ¿Cómo es que no se mezclan y unen, puesto que alcanzan a la vez al ojo (figura 7.1.), sino que se ordenan unas a la derecha, otras a la izquierda, unas arriba, otras abajo? Los ídolos y formas impresas en el medio son unidades coherentes, holísticas o globales del objeto, no analizables en puntos que correspondan biunívocamente con puntos del sensorio, por lo que no hay manera de geometrizarlas.

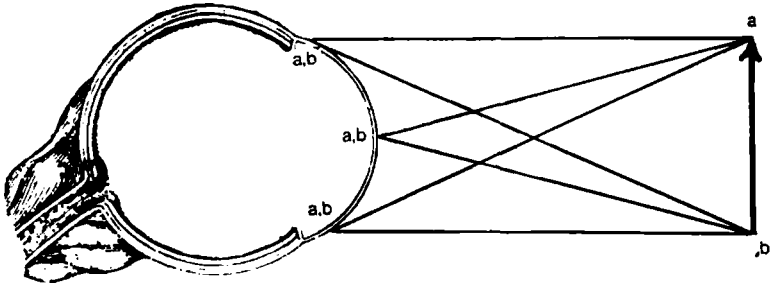


Figura 7.1.

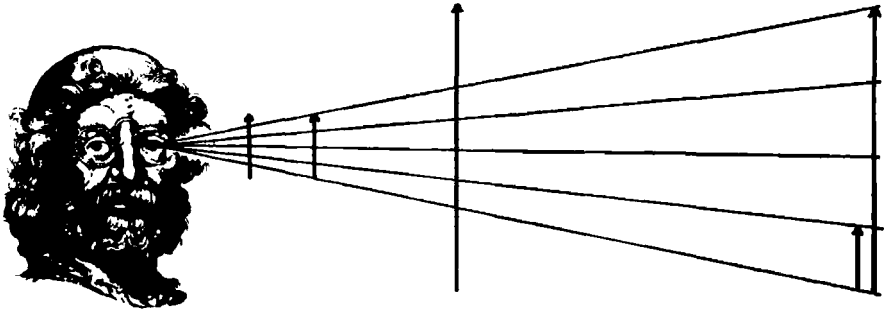


Figura 7.2.

Quizá por ese motivo los geómetras griegos adoptaron la doctrina pitagórica. Si el ojo emite un cono de rayos divergentes (figura 7.2.), es fácil explicar la transmisión rectilínea, el orden de los objetos en el campo visual (se ven arriba los objetos alcanzados por los rayos superiores) y la disminución del tamaño aparente con la distancia, pues cuanto más lejano está un objeto más próximos se hallan los rayos que van a sus extremos. Así, a partir de una docena de postulados relativos a los rayos visuales, Euclides demostró las proposiciones de la perspectiva y la catóptrica (los fenómenos de la reflexión). Les gustara o no la doctrina pitagórica, los practicantes de la óptica geométrica no tenían otra salida para obtener resultados.

Así, en el siglo I, Herón dio una linda demostración de la ley de reflexión (el ángulo de incidencia y reflexión son iguales) a partir de un principio físico del mínimo, basado en la intuición de que la luz se mueve tan aprisa «que no tiene tiempo para recorrer una trayectoria mayor». El problema, pues, es determinar el punto P del espejo CD (figura 7.3.) tal que el camino APB, del objeto al ojo pasando por el espejo, sea un mínimo. El procedimiento es construir B' en la perpendicular de B al espejo y a la misma distancia de él, con lo que todos los puntos del espejo equidistarán de B y B'. Por tanto se sustituye el problema original por el equivalente de hallar la distancia más corta entre A y B'. Obviamente es la recta AB', que corta al espejo en P. De ahí es trivial que los ángulos APC y B'PD, opuestos por el vértice, son iguales; pero, por la construcción, B'PD = BPD; ergo APC = BPD, respectivamente los ángulos de incidencia y reflexión (hoy llamamos así a sus complementarios).

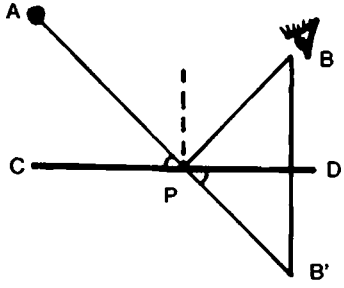


Figura 7.3.

Al siglo siguiente, Ptolomeo desarrolló la óptica geométrica como había hecho

con la astronomía, no siendo superado hasta el XVII por obra también de Kepler. Una gracia especial de la óptica helenística es la de aunar técnicas geométricas y de laboratorio. Ptolomeo establecía experimentalmente las leyes básicas mediante series de mediciones realizadas con instrumentos fabricados ad hoc, con un círculo graduado provisto de dioptras y radios móviles. Con él hizo series de medidas de refracciones para incidencias de diez en diez grados de las que no logró extraer la ley (descubierta por Snel hacia 1621), debiendo conformarse con aproximaciones. Así pues, los griegos desarrollaron la óptica geométrica como la primera ciencia en que se combinan la experimentación y la deducción para establecer las proposiciones del campo.

Pero un desarrollo tan prometedor se asentaba en un modelo de visión poco creible. ¿Acaso cuando miramos las estrellas, su inmensa esfera de éter perfecto queda instantáneamente llena de una substancia terrestre emanada de nuestros diminutos ojos? ¿Y no hay que esperar la salida del sol para ver?

7.2. Otra vez los árabes

Los árabes estaban muy familiarizados con la doctrina de Galeno sobre la visión, tan interesante en fisiología como la de Aristóteles en filosofía natural, aunque ambas igualmente inútiles en óptica. Como en el caso de la astronomía, no se sentían felices creyendo cosas distintas sobre la luz y la visión. Y del mismo modo que los astrónomos de Maraġa se sintieron felices cuando consiguieron resultados geométricamente equivalentes a los ptolemaicos pero derivados de principios físicamente sostenibles, Ibn al-Haytam, el Alhazén de los cristianos, consiguió obtener los teoremas de la óptica a partir de un modelo más realista de la luz como algo emitido desde los objetos iluminados.

Ya señalamos las dificultades de las teorías objetivas con sus imágenes holísticas. En el s. IX, el primer filósofo árabe, al-Kindī, sostenía una metafísica de la luz como emanación neoplatónica que se automultiplica y propaga fuerzas mediante sus rayos. El inició una vía de elementarización del objeto en puntos luminosos, considerando la visión al modo galénico como interacción entre los rayos que emanan del ojo y los que emanan de cada punto del objeto. Apoyándose en él, un siglo más tarde Ibn al-Haytam ingenió un modelo para coordinar biunívicamente los puntos del ojo y los del objeto, suponiendo que de éste emanan rayos en todas direcciones, sin recurrir a los rayos subjetivos. Según él, sólo afectan al ojo aquellos rayos que inciden normalmente sobre la pupila (figura 7.4.). De este modo se tiene una teoría de emanación objetiva, físicamente plausible y sin problemas ópticos, pues se reproduce el cono de rayos de los geómetras (aunque ahora se mueve hacia el ojo y no desde él). Ampliando la tradición ptolemaica, su

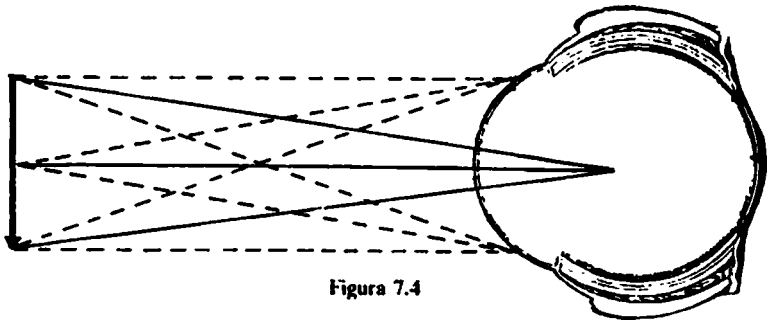


Figura 7.4

óptica combina con gran originalidad la inducción experimental y la deducción matemática. A partir del siglo XIII su influencia fue considerable sobre los cristianos como R. Bacon, siendo popularizada por Witelo, punto de referencia de Kepler en sus *añadidos a Vitello* (1604).

No menos importante fue el influjo de la metafísica de la luz. Grosseteste y R. Bacon siguieron la huella de al-Kindī. El carácter híbrido de la luz, entre la materia y el espíritu, capaz de transmitir el calor y vivificar la tierra, favoreció su concepción como un agente activo, espontáneo e ingrávido. Según estos neoplatónicos, la luz es el vehículo de la creación que emana de un punto y se automultiplica autónomamente en esferas crecientes. Como emanación divina, es a la vez causa material, formal y eficiente de la creación. A medida que se expande por su fuerza intrínseca, crea el espacio y disemina por él la materia prima y, confiriéndole forma, crea los cuerpos.

Este tipo de ideas está muy presente como modelo de acción a distancia en los matemáticos modernos más neoplatónicos, Kepler o Newton. Pero también se encuentran sus huellas en los mecanicistas más estrictos como Hobbes y Descartes. Este último, en *El Mundo, o tratado de la luz,* ofrece una cosmogonía a base de materia y movimiento creados por Dios en una cantidad constante y conservada. En cualquier caso, el carácter de la luz como algo sutil y capaz de interactuar con la materia, tanto a través de vastas distancias como entre las separaciones de los cuerpos más diminutos, la convirtieron en una entidad cuya explicación abría el camino para el estudio del cosmos y del microcosmos a través de sus interacciones. Aun para quienes no la consideraban ultramundana y espiritual, la luz no era exactamente como el resto de la materia.

7.3. Las lentes y los filósofos

Los desarrollos instrumentales del Renacimiento plantearon a la óptica geométrica el problema de la refracción con cierta perentoriedad: El uso de lentes desde finales de la Edad Media debió llevar a muchos artesanos al descubrimiento de sus efectos combinados. G. B. Porta, en la 17.ª edición de su *Magia natural* (1589), señalaba que «las lentes cóncavas permiten ver con

claridad las cosas lejanas y las convexas, las próximas», por lo que «si sabes juntar adecuadamente unas y otras, verás aumentadas y claras las cosas próximas y lejanas». La publicación cuatro años más tarde de su *De refractione* no marcó ningún hito, pero al año siguiente de publicar esas palabras se construyó en Italia el primer catalejo. Al parecer fue copiado y desarrollado por los ópticos holandeses de Middleburg. En 1609, uno de ellos, H. Lipperhey, trató de venderlos en Venecia y despertó el genio inventivo de Galileo, quien llevó aquel modelo al límite de sus posibilidades de desarrollo, usándolo como telescopio con los resultados vistos en el Capítulo IV.

Sin embargo, Galileo no sabía cómo funcionaba, habiéndolo obtenido por ensayo. La clave de su explicación óptica estaba en los *Añadidos a Vitello* (1604) de Kepler, en los que la óptica geométrica alcanzara el mayor desarrollo desde los tiempos de Ptolomeo, siguiendo las pistas de al-Haytam y Witelo. Refracciones, reflexiones, formación de imágenes, etc., se derivan de una consideración física pero abstracta de la luz como infinitos rayos procedentes de los objetos, que no son sino las líneas del movimiento de la luz que está en las superficies perpendiculares a los rayos. Tampoco Kepler dio con la ley de refracción a pesar de sus mediciones, aunque averiguó que los ángulos de refracción son aproximadamente proporcionales a los de incidencia cuando éstos son menores de 30.º Con todo, usó el fenómeno de la refracción para mejorar la teoría de la visión de al-Haytam. Los seguidores de éste habían considerado zona sensible la superficie del cristalino, a fin de no enfrentarse a la inversión de la imagen tras su refracción en la lente. Sin embargo, Kepler no tuvo problemas para recurrir a una regla psicofísica de inversión. Merced a ello construye por primera vez la imagen en la retina, estableciendo un doble cono de rayos (figura 7.5.) que une cada punto del objeto con cada uno de los puntos del cristalino. Este,

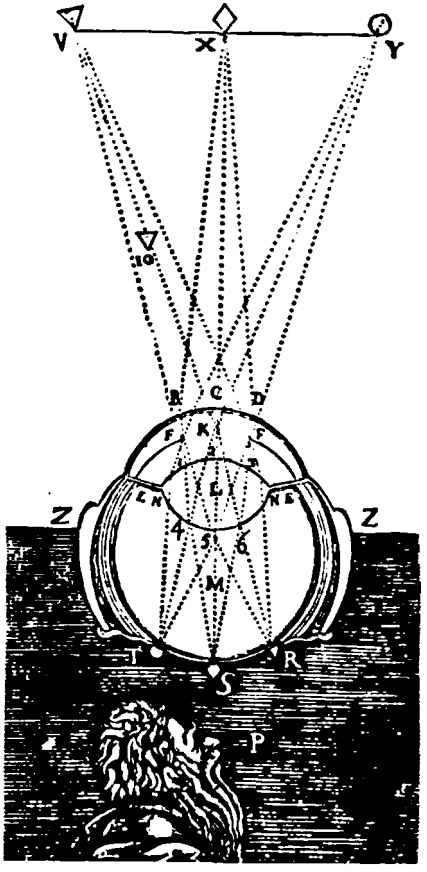


Figura 7.5.

que tiene una forma «abombada» para evitar la aberración esférica, envía todos esos rayos a un punto único en la retina, lo que asegura la necesaria correspondencia biunívoca entre los puntos del objeto y la imagen retiniana. Así, la teoría de la visión conoció el mayor avance de su historia.

En dicha obra, Kepler sólo se ocupaba de las lentes para gafas de corrección de miopía y presbicia, pero tan pronto como apareció la *Gaceta sideral* (1610) de Galileo, puso manos a la obra y al año siguiente publicó su *Dióptrica*, donde da razón adecuadamente del funcionamiento óptico del telescopio. Con Kepler, la óptica geométrica se convirtió en un instrumento acabado en lo fundamental, aunque susceptible de refinamientos como la ley de refracción. Restaba, sin embargo, avanzar en la comprensión de la naturaleza física de ese algo externo que es la luz, que progresa y se inflexiona como describe la óptica geométrica. En física hubo dos modelos que se disputaron el terreno desde mediados del XVII hasta nuestro siglo. Ambos concebían la luz como algo objetivo con una causa externa, pero mientras que unos la tenían por una substancia, corpúsculos lanzados desde los cuerpos luminosos, otros la consideraban como una alteración mecánica local en un medio continuo.

7.4. Las teorías del medio

Descartes formuló una teoría de tipo aristotélico, en la que la luz era una alteración mecánica en un medio (*vide* cap. V). Descartes adaptó a sus doctrinas muchas ideas tradicionales, como el interés aristotélico por el origen de las cualidades, el neoplatónico por la luz, o la visión estoica de un éter extendido por todo el espacio y capaz de sufrir variaciones de «tensión» y asegurar la conexión de las partes. Sin embargo, todo eso se despojó de misterio, reformulándose en términos mecánicos estrictos más propios del herrero de la esquina que de un filósofo desmelenado. La metafísica de la luz, por ejemplo, quedaba harto maltrecha negando que hubiese tal substancia y reduciendo el fenómeno a una mera presión de un éter material.

Este modelo de luz, como decíamos, tenía grandes problemas para explicar los fenómenos básicos de la óptica geométrica, como la transmisión rectilínea (con la existencia de sombras) y el orden de imágenes en el campo visual. Por ello, Descartes recurre a modelos metafóricos, cuando no oportunistas (menciona las hipótesis de los astrónomos), para explicar diversas propiedades de la luz. La idea mecanicista fundamental de la luz como presión transmitida por un medio interpuesto sin desplazamiento de materia, se expresa con la imagen de un ciego que «palpa» los objetos con un bastón. El bastón es el éter intermedio entre el ojo (la mano) y el objeto, capaz de transmitir instantánea y rectilíneamente la afección.

Más, aunque un bastón rígido se comporte globalmente como el éter, no posee su estructura. De ahí el segundo ejemplo de una cuba llena de uvas y

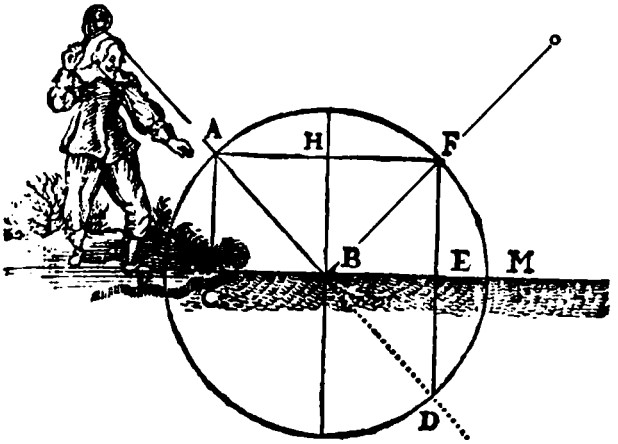


Figura 7.6.

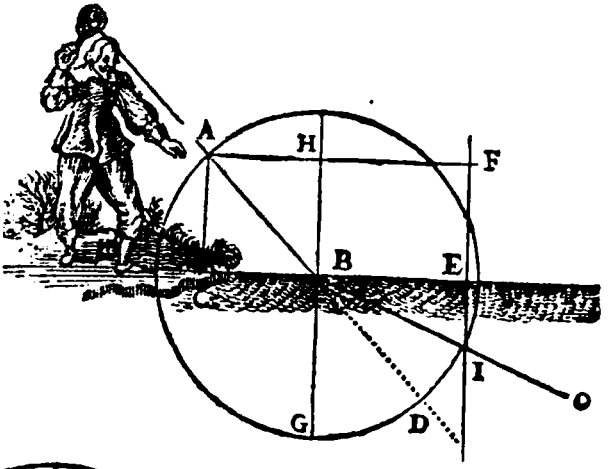


Figura 7.7.

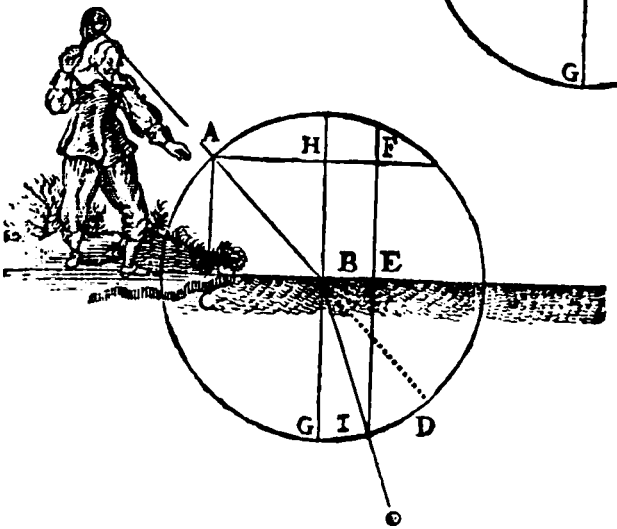


Figura 7.8.

mosto, el cual es modelo del éter diseminado entre los intersticios de la materia, capaz de ejercer presión hidrostática en todas direcciones a través de las trayectorias sinuosas permitidas por los poros. Asimismo, puede transmitir las presiones provenientes de distintas fuentes sin que interfieran entre sí, tal y como ocurre con la luz del Sol y la Luna o las de todas las estrellas. Los rayos no son sino abstractas líneas rectas por las que se transmiten esas presiones al margen de la materia gruesa interpuesta y sus movimientos.

Con todo, hay otras propiedades de la luz que no se pueden explicar así; por ejemplo, la transmisión rectilínea, pues en un medio continuo cada punto se torna en origen de la alteración, con lo que ésta consigue rodear los obstáculos, como ocurre con el sonido. Tampoco se puede explicar, v.g., la reflexión, pues cada punto del espejo es un centro de radiación en todas direcciones. De Descartes a Huygens media un largo proceso de más de medio siglo hacia la definición de los rayos matemáticos como simple dirección de transmisión de la perturbación, hacia la caracterización de ésta como fenómeno periódico, y hacia la construcción del frente de onda como superficie de fase continua. Entre tanto, Descartes sustituye su concepción física de la luz por un modelo corpuscular ad hoc mucho más operable. Para el geómetra, la mecánica de partículas en el vacío era muy amable, y a ella había recurrido Descartes en el caso de la ley de inercia y las reglas de impacto, aunque sólo fuera como licencia geométrica.

En este tercer modelo, el aplicado a la óptica geométrica, la luz es un bombardeo de partículas lanzadas desde el cuerpo luminoso. En este modelo se obtiene con facilidad la ley de reflexión (figura 7.6.). La pelota, tras recorrer AB, llega al suelo CE que le impide el paso sin restarle movimiento. Por ello, en el mismo tiempo que recorrió AB habrá de recorrer la misma distancia en otra dirección; ergo se trasladará a algún punto de la semicircunferencia KAFM. ¿Cuál? El movimiento de AB puede descomponerse en AC y AH; ahora bien, la componente horizontal del movimiento, que no sufre alteración, llevará a la pelota a algún punto de FD, a la misma distancia de HB que ésta de AC. Pero F es el punto común de esta línea y la semicircunferencia. A partir de ahí es trivial probar la igualdad de los ángulos de incidencia y reflexión.

Descartes anduvo por Leiden cuando Snel hacía sus experimentos para hallar la ley de la refracción, que publicaría Descartes (sin prueba experimental) unos veinte años más tarde, por lo que se conjetura que se trató de un plagio. En cualquier caso, la refracción resultaba problemática, pues un proyectil que pase del aire al agua perderá velocidad y se moverá por una línea que se aleja de la normal (figura 7.7.), mientras que con la luz ocurre todo lo contrario, pues la refracción en un medio más denso tiene lugar hacia la normal (figura 7.8.). Eso llevó a Descartes a adoptar la posición anti-intuitiva de que la velocidad de la luz aumenta en medios más densos.

Con el modelo realista de un medio continuo eso sería injustificable, pero con el de las bolas se hace más llevadero considerando que un medio más *denso* es también más *duro*, y ¿acaso las bolas no ruedan mejor sobre el mármol que sobre la alfombra?

Descartes demuestra la ley de la refracción a partir de su modelo físico. La idea es que la velocidad del corpúsculo refractado bajo CBE, v_r, es mayor que la de incidencia, v_i. De ahí que el tiempo invertido en recorrer AB sea mayor que el empleado de B a la circunferencia tras la refracción, por lo que la componente AH se verá disminuida en el medio más denso en la misma medida en que se acorta el tiempo o aumenta la velocidad; o sea, $AH / GI = v_r / v_i$. Pero AH y GI son los senos de los ángulos de incidencia y refracción; y como v_r / v_i, es constante para cada par de medios, los senos son proporcionales, Q.E.D.

Obtenía así una ley fundamental a partir de un modelo físico de la luz, aunque ad hoc y con condiciones de velocidad criticables. En el *Tractatus opticus* (1644), Hobbes fue el primero que derivó la ley de senos de una relación de velocidades propia medios continuos, en los que la velocidad disminuye con la densidad: $sen_i / sen_r = v_r / v_i = const.$ Mas estas teorías hubieron de recorrer aún mucho camino. En 1665, Hooke descubrió los anillos llamados «de Newton» (bandas de colores alternativas producidas por interferencia en láminas finas) y desarrolló una teoría realmente ondulatoria en la que la alteración local del medio era una vibración rápida y corta de las partículas de éter, reconociendo de este modo el carácter periódico de la alteración. Ese mismo año, Grimaldi descubrió la difracción (la invasión por la luz de la sombra geométrica) que intentó explicar mediante un fluido vibrante, cada uno de cuyos puntos era a su vez fuente de alteraciones, lo que planteaba problemas con la refracción y reflexión ordinarias. Pero, en cualquier caso, estos fenómenos nuevos parecían favorecer un modelo de alteraciones periódicas en un medio continuo. Sin embargo, hasta un cuarto de siglo más tarde no se pudo sistematizar deductivamente la óptica geométrica con modelos ondulatorios. En 1692, Huygens expuso en el *Tratado de la luz* su principio según el cual cada punto, d, (figura 7.9.) es efectivamente fuente de alteraciones, pero las ondas secundarias que parten de ellos sólo se ven en su tangente común DE: esto es, el *frente de onda* es el lugar común de los puntos alcanzados por la perturbación local en un tiempo dado, con velocidades inversas a las densidades de los medios.

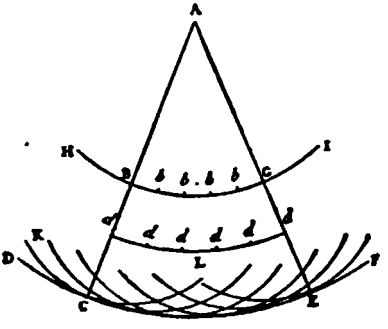


Figura 7.9.

7.5. Atomos y colores

Para finales de siglo, ambas concepciones de la luz estaban en similar disposición de explicar las leyes de la óptica, pero aún entonces la corpuscularista llevaba ventaja en la explicación de los colores.

Isaac Newton era un convencido atomista para quien Dios había creado el mundo a base de muy poca materia pasiva y fuerzas inmateriales. Casi todo era vacío, pues se decía que si toda la materia del universo se juntase sin dejar huecos, cabría en la cáscara de una nuez: lo que parece una superficie sólida continua son en realidad las fuerzas a distancia asociadas a unas pocas partículas. Esto es, la materia es mucho menos importante que la fuerza inmaterial, y la luz es un tipo de materia especialmente sutil dotada de principios de actividad muy enérgicos. De una manera concorde con la metafísica de la luz, llegó a conjeturar que tal vez la luz y los cuerpos fuesen interconvertibles, derivando la actividad de éstos de las partículas de aquélla que contienen. A lo largo de su vida dudó entre asociar esas fuerzas a unas substancias privilegiadas (luz, éter, electricidad, las colas de los cometas) o atribuirlas a la acción directa de Dios, quien movería así el mundo como nuestra alma a su cuerpo. En cualquier caso, esas fuerzas se conducían según leyes matemáticas como la de la gravitación universal. Pero, mientras que en el sistema del mundo Newton sintetizó cuanto había que saber, en la óptica se quedó a las puertas de averiguar cuál era la trama microfísica de la creación a través de las interacciones entre la luz y la materia.

Newton concebía la luz como un chorro de proyectiles cuya velocidad aumentaba con la densidad del medio atravesado. De ahí derivaba la ley de senos, pero sin la incoherencia de Descartes. Primero, porque lo creía realmente y luego, porque el aumento de velocidad era coherente con un mundo casi vacío, en el que las partículas de los cuerpos transparentes tienen muy poca probabilidad de interponerse en la trayectoria de la luz, mientras que la presencia de fuerzas atractivas asociadas a la mayor densidad de materia la acelera. Así pues, cuando una partícula de luz llega a un medio refringente más denso, sufre durante un lapso una aceleración normal a la superficie de separación, con lo que su trayectoria es una parábola galileana hasta alcanzar la velocidad típica del nuevo medio, momento en que reanuda su movimiento rectilíneo. Pero como las refracciones van acompañadas de dispersión de los colores, quizá eso se deba a que cada color corresponde a una partícula de distinta velocidad. Sin duda por eso le preguntó una vez al Astrónomo Real si la primera aparición de los satélites de Júpiter tras un eclipse era roja. No lo era, por lo que pensó que tal vez difirieran en masa, lo que a su vez rompía la proporcionalidad entre masa y aceleración típica de la gravedad, de modo que no hizo mucho hincapié en el asunto: el mundo de los átomos se le resistió más que el de los astros. Con

todo, el Newton matemático de los *Principia* se mostró en la *Optica* como un experimentador agudo e infatigable, descubriendo y dando razón de muchas propiedades y fenómenos de los colores que las doctrinas ondulatorias no pudieron explicar hasta el siglo pasado.

Los teóricos del medio continuo consideraban que la luz blanca era un estado excitado del medio, el cual, si se alteraba de alguna manera, se orlaba de rojo y azul en los bordes (usaban distancias muy cortas entre prismas y pantallas (figura 7.11), por lo que no obtenían una buena dispersión cromática). Concretamente, tendían a decir que los colores eran una alteración del pulso blanco producido por su contacto con la sombra o medio inexcitado. En *Los meteoros*. Descartes suponía que en la refracción, las partículas adquirían un efecto, girando a la misma velocidad con que avanzaban. Descartes explica (figura 7.10.) cómo la partícula 1234 adquiere el efecto en cuestión cuando la parte 3 frena al entrar en el medio X, mientras que la 1 sigue moviéndose aprisa. Ahora bien, las partículas que van por EH (figura 7.11.) se encuentran con que las partículas inalteradas de la sombra hacia la que se desvian por la refracción frenan el giro. Esa menor velocidad se percibe como azul. A su vez, las que están junto al borde DF ganan efecto, lo que se percibe como rojo.

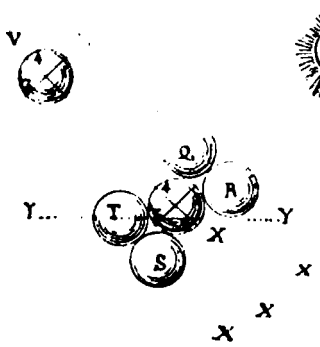


Figura 7.10.

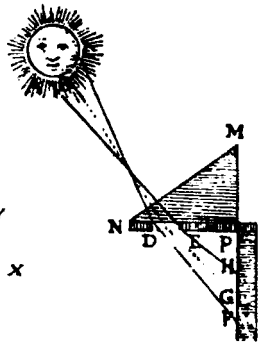


Figura 7.11.

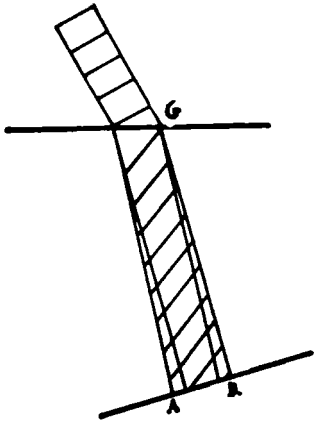


Figura 7.12.

Otros teóricos del medio continuo usaban diversos modelos, pero siempre entendían la aparición de los colores como modificación del pulso original. Por ejemplo, Hooke concebía la luz como una vibración longitudinal, con frentes de onda gd (figura 7.12.) normales a la dirección de propagación. Pero en una refracción, el extremo g que llega antes que el de a la superficie del medio más denso, recorre por éste una distancia gF mayor que dE, con lo que los pulsos refractados son oblicuos a los rayos. El medio en reposo debilita el movimiento en los límites con la sombra, por lo que en

A tenemos un pulso en el que la parte más débil precede a la más fuerte, produciendo en el sensorio la percepción del azul, mientras que en R (rojo) tenemos un pulso cuya parte fuerte precede a la débil.

Para Newton la situación es muy otra. Lejos de ser una entidad simple, la luz blanca es la mezcla de todos los rayos de colores, producidos presuntamente por partículas con diferente masa u otra propiedad intrínseca e inalterable. Lo único que hace el prisma es dispersar los corpúsculos de cada tipo por su diversa manera de interactuar con la interfaz refractante, sin que los modifique en lo más mínimo. Newton puso a prueba cualquier teoría de los colores como modificación de la luz blanca, comparándola con la suya según la cual los colores son propiedades innatas e inalterables, siendo la luz blanca su mezcla. En un experimento crucial (figura 7.13.) practicó un agujero en el postigo de la ventana y colocó un prisma ABC en el haz de luz dispersando los colores en una pantalla DE suficientemente distante. Esta pantalla tenía un agujero G por el que hacía pasar cualquier color prismático mediante una pequeña rotación del prisma ABC. Colimado por Gg, hacia incidir cada color separadamente sobre un segundo prisma, abc, observando no sólo que cada color posee un índice de refracción constante y distinto de los de los demás (aumentando del rojo al azul), sino que además no se produce ninguna modificación ulterior de la luz monocromática por más refracciones que se le haga sufrir. Por tanto, lo único que hace el prisma es *separar* los colores ya presentes en la luz blanca sin *modificarlos* para nada.

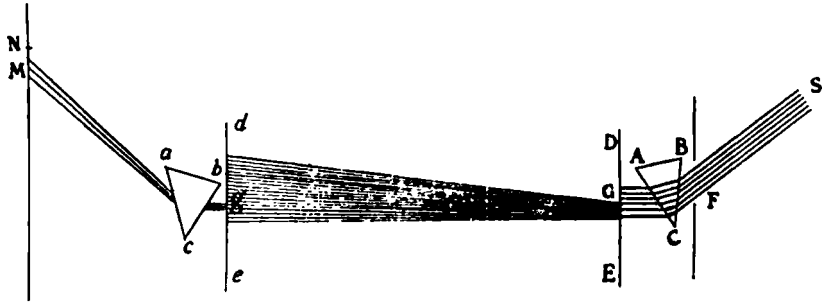


Figura 7.13.

Además de *analizar* la luz blanca en sus componentes monocromáticos, se puede también *sintetizar* mezclando colores puros procedentes de diversos prismas. La variedad y riqueza de los experimentos newtonianos y su interpretación corpuscular sobrepasaron la capacidad de sus rivales y de sus hipótesis ondulatorias. Además, al mecanizar la naturaleza de los colores, demostrando la conexión constante entre color e índice de refrangibilidad, convirtió en ciencia matemática unos fenómenos, los colores, que hasta entonces habían sido una curiosidad de los naturalistas.

7.6. Las entrañas de la creación

Newton atacó también (con éxito desigual) fenómenos nuevos como la difracción, la doble refracción del espato de Islandia, los anillos de Newton o la transmisión nerviosa de la retina al cerebro. Para algunos de ellos supuso la existencia de un éter raro en el que las partículas luminosas excitaban vibraciones con las que podían interactuar, por lo que su teoría lograba atacar, como las ondulatorias, algunos fenómenos periódicos. Pero lo más interesante es que la interacción entre la luz y la materia ordinaria permitía al matemático ir aún más lejos, adentrándose en los arcanos microfísicos.

Por ejemplo, Hooke descubrió que los anillos de bandas de interferencia formadas en las láminas delgadas de moscovita eran un fenómenos periódico. Newton reprodujo el fenómeno entre una placa de cristal y una lente de curvatura conocida y determinó el groso de la lámina que producía cada color (figura 7.14.). Una vez establecidos los diferentes órdenes de colores y los grosores que los producen (expresados en unidades de $2{,}5 \times 10^{-6}$ cm), conjeturó el tamaño de los átomos de los cuerpos. En efecto, las partículas atómicas no tienen color, sino que los cuerpos derivan los suyos de las absorciones y reflexiones de luz producidas en su superficie, a la manera de lo que ocurre en las láminas delgadas. De ahí que si el color de un cuerpo coincide con el de uno de los órdenes de los anillos, es probable que el tamaño de sus átomos coincida con el grosor de la lámina que los produce.

La interacción entre luz y materia permite avanzar en microfísica, sustentando conjeturas cuantitativamente formulables, no sólo acerca del tamaño y estructura de los átomos, sino también de las fuerzas que operan a esos niveles. Por ejemplo, ya mencionamos que para el atomismo dinámico de Newton la diferencia entre los corpúsculos productores del rojo y del azul debe ser la cantidad de movimiento, que puede variar con la masa o con la velocidad. Tras refutar, después de la consulta al astrónomo real Flamsteed, la posibilidad de un modelo de dispersión basado en la velocidad, ensayó un modelo basado en la masa. Pero remitir las refracciones diferenciales a distintos efectos de las fuerzas a distancia sobre partículas de diversa masa entrañaba romper la proporcionalidad entre masa y aceleración encontrada en el mundo macrofísico. Eso lo condujo más lejos aún, a conjeturar mecanismos de apantallamiento merced a la operación de fuerzas interatómicas inversas de potencias de la distancia mayores de 2, con lo que las atracciones serían una función de la capa y no de la masa total, con lo que las partículas mayores no actuarían con toda su masa.

A pesar de los esfuerzos de Newton, estas especulaciones no llegaron a cristalizar en el descubrimiento de las leyes de fuerza capaces de sistematizar deductivamente la trama atómica del mundo, tal y como había hecho con el cosmos visible merced a la ley de la gravitación universal. Pero justa-

mente este fracaso muestra el éxito del enfoque matemático de la microfísica newtoniana frente al mecanicismo. Cualquier mecanicista cartesiano al uso hubiera escrito varios tratados con conjeturas la mitad de interesantes que las de Newton. Sin embargo, éste no publicó casi nada, exceptuando las insinuaciones apuntadas como tales al final de la *Optica*. La razón estriba en que los modelos matemáticos poseen consecuencias numéricas precisas. Si los datos experimentales no encajan con ellas, tales modelos quedan desacreditados. Por el contrario, en el mundo laxo de un mecanicismo ima-

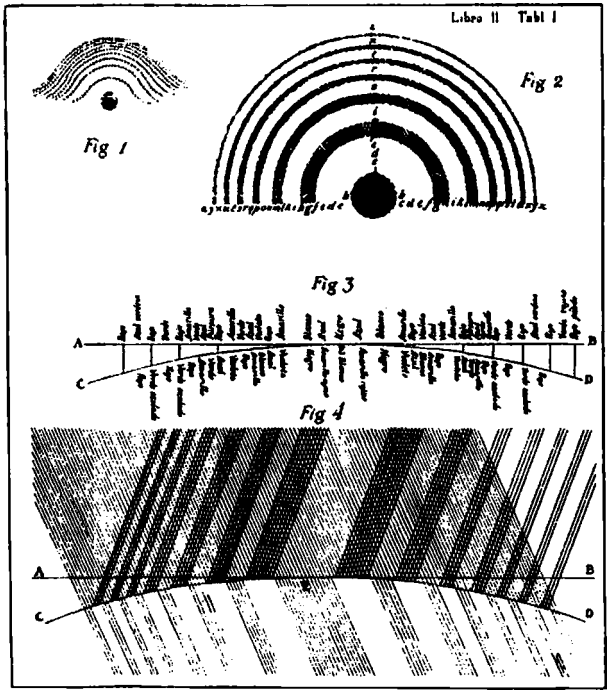


Figura 7.14.

ginado, cualitativo y vagoroso, se puede navegar indefinidamente contra la corriente de las observaciones y experimentos. Un ejemplo del proceder de Newton mediante la formulación de modelos mecánicos matemáticos puede verse en la sección XIV del primer libro de los *Principia*, donde se establecen las condiciones de fuerzas que pueden producir las refracciones, reflexiones e inflexiones de la luz. Pero al pasar de las matemáticas a la física, las dificultades de los modelos de dispersión dejaron en suspenso la teoría. En estos dominios faltaban aún experimentos bastantes para recabar la base inductiva a partir de la cual conjeturar las leyes de fuerza fundamentales operantes en el universo. Y en eso estamos ahora.

8.

La física experimental

Tanto las viejas ciencias matemáticas (astronomía, óptica geométrica, hidrostática) como las nuevas (óptica física, cinemática) recurrían a observaciones cuantitativas precisas, como las astronómicas, y realizaban experimentos sofisticados con equipo de laboratorio especialmente diseñado, como los refractómetros de Ptolomeo o los planos inclinados de Galileo. Por más que en este tipo de física matematizada se hiciesen experimentos muy precisos, la denominación de *física experimental* se aplica a campos de la filosofía natural en los que, en ausencia de teorías y de fenómenos bien conocidos, lo único que cabía hacer era explorar experimentalmente el terreno.

Los fenómenos térmicos, eléctricos, magnéticos, químicos, metalúrgicos, en general los conectados con las técnicas del fuego, con el vacío, con las ciencias naturales y de la tierra, no es tanto que no estuviesen bien explicados, sino que en muchos casos ni siquiera se conocían. La experimentación y la elaboración de *historias naturales* era la única vía de ataque.

La astronomía, la óptica o la teoría del movimiento llegaron al siglo XVI con una larga historia, con un amplio bagaje de hechos bien establecidos y de regularidades y leyes, no menos que con una cierta variedad de enfoques teóricos. Adaptando una feliz expresión de Cristo, diremos que en esos dominios la Revolución Científica consistió en fabricar nuevos odres para vino viejo, mientras que en los campos de estudio recomendados por F. Bacon consistió más bien en hacerlos nacer, partiendo del saber ciego acumulado en la tradición artesanal y adaptando su modo de proceder práctico y manual.

Hay varias razones para la diferencia del estilo experimental en las ciencias matemáticas y en las baconianas. En primer lugar, los fenómenos de las primeras son relativamente simples. Por ejemplo, ya señalábamos cómo los

fenómenos astronómicos están de partida casi reducidos a su esqueleto geométrico: variaciones cíclicas de distancias angulares entre puntos situados en una superficie esférica. Por el contrario, los de las segundas constituyen sistemas complejos y opacos en los que no está claro qué propiedades se han de abstraer para redefinirlas como conceptos métricos, como funciones que vayan de un conjunto de entidades físicas a los reales. Piénsese en el conocimiento ordinario de la respiración, la combustión o el viento para calibrar el largo camino por recorrer hasta ese estadio.

En segundo lugar, la situación se agrava porque una buena parte de las áreas experimentales constaban de fenómenos manufacturados que no se daban de modo obvio en la experiencia común de la época. El conocimieto de los fenómenos magnéticos dependió de la manufactura y uso de la aguja de marear; el de los eléctricos, del desarrollo de generadores y acumuladores electrostáticos, así como de electroscopios; el de los relativos al calor, de termómetros y calorímetros; el de los del vacío y la pneumática, de barómetros y bombas de vacío que crearon una entidad física nueva en el s. XVII; etc. A este respecto se puede decir que estos campos son *esencialmente* experimentales porque sin instrumentos de laboratorio sencillamente no se dan.

En tercer lugar, sin hechos bien establecidos, sin conceptos métricos, sin leyes y teorías, los experimentos son un tanto aleatorios, exploratorios y heurísticos. Contrastan así con los experimentos de los matemáticos, diseñados hasta los mínimos detalles para responder a preguntas teóricas, como ocurría con el experimento crucial de Newton sobre la luz, en el que se prevén dos resultados posibles. En los experimentos baconianos, vagamente orientados por marcos filosóficos, nunca se sabe qué va a surgir. En algunos casos son especialmente erráticos, como cuando se introducen en la campana de vacío ratones, velas, pólvora, relojes o lo que sea simplemente para ver qué pasa. O como cuando se destila cualquier cosa, una docena de sapos o una libra de buen café sólo para *experimentar*.

No obstante, se dieron ciertas directrices generales. En el XVI predominaba en estos campos la perspectiva hermética conectada con la clave química de un Paracelso o la mágico-neoplatónica de Agrippa, el prototipo histórico del Fausto de Goethe. Hacían hincapié en la vida activa del mago que actúa operativamente sobre la realidad (una de las fuentes del experimentalismo), apelando a simpatías, signaturas y conexiones simbólicas a distancia. Mas, a partir del XVII, dominó la perspectiva mecánico corpuscular que compartía con la anterior el gusto por las causas *ocultas*, en este caso no en sentido epistemológico sino microscópico. Aquí se asimilaba la naturaleza a las máquinas artificiales, construibles, montables y desmontables, lo cual era algo más preciso por cuanto postulaba mecanismos claros continuos con la geometría, aunque no mucho más útiles a falta de principios puente que los conectase cuantitativamente con las leyes fenoménicas descubiertas. En cualquier caso, orientaron acerca de qué buscar y medir, y si

como decía mi Señor Bacon, la verdad sale más fácilmente del error que de la confusión, obtuvieron una buena dosis de falsedades prometedoras.

Entre tanto, no es de extrañar la aparición de actitudes prudencialistas contrastantes con la posición «dogmática» de los matemáticos que pretendían demostrar la verdad de sus doctrinas. Consistían en abrazar un cierto escepticismo en materias teóricas y una actitud reverente hacia los hechos u obras de la naturaleza. Sus informes experimentales eran detallados y repetibles, mientras que los de los matemáticos, como Galileo o Pascal, fueron con frecuencia sumarios y subordinados a la ejemplificación de tesis teóricas.

Paulatinamente aparecieron conceptos básicos, con la distinción entre calor y temperatura o entre cuerpos eléctricos y no eléctricos. Ello posibilitó la cosecha de algunas generalizaciones, como la subida no lineal de la temperatura con el calor, debido al calor latente, o como la polaridad eléctrica; y por esta vía se habría de llegar, todavía en el siglo pasado, a la asimilación de estos campos al modo matemático de hacer ciencia. En general, las primeras conjeturas teóricas sobre estos fenómenos experimentales se formularon en términos o bien dinámicos o bien de fluidos imponderales específicos. Por ejemplo, Hooke desarrolló un modelo cinético del aire que daba cuenta de la ley de Boyle, interpretando la presión como frecuencia de impactos de los corpúsculos con la frontera, inversamente proporcional a la distancia atravesada entre impactos, función a su vez del volumen. Pero la dificultad de salvar el hiato entre el mundo microscópico y el fenoménico favoreció las doctrinas subtancialistas que trataban al calor como un fluido que salía o entraba en las reacciones químicas de los cuerpos, y que podía asimilarse al agua para explicar la producción de un efecto mecánico merced a su caída de un depósito alto (en temperatura) a otro bajo. La tradición newtoniana de la *Optica* dio pábulo a la postulación de éteres, efluvios y fluidos de materia no ordinaria, sin peso o inercia, esto es, no mecánica, para el caso de la electricidad, el magnetismo, el calor, la combustión o la luz. Estos fluidos son típicos de muchos desarrollos teóricos dieciochescos.

A la larga, muchos de esos campos (no todos) acabaron asimilándose a las ciencias matemáticas, aunque con diverso ritmo. Unos desde el comienzo, por su carácter mecánico, como los fenómenos de los impactos elásticos o los de resortes (ley de Hooke). Otros se hallaban muy cerca de ello, como los abordados en los experimentos de Galileo para fundamentar el estudio de la resistencia de los materiales a la fractura, de los que nos ocuparemos más abajo, que dieron pie muy pronto a la matematización de la penumática como extensión de la hidrostática. Se pueden hallar todas las gradaciones intermedias hasta el extremo de la química y las áreas conectadas con la vida que no alcanzaron tal nivel. Aunque la constitución de estos grupos de fenómenos como ciencias autómatas cae por lo general fuera de nuestro período de estudio, ofreceremos algunos ejemplos de las actividades experimentales realizadas en ellos.

8.1. El origen de la filosofía experimental

Problemas similares engendran respuestas comparables. Los primeros sucesores de Aristóteles en el Liceo, Teofrasto y Estratón, subrayaron las explicaciones naturalistas, sustituyendo las cuatro causas por factores como el calor, el frío, la humedad, etc. También se rechazó el hiperracionalismo de suponer que todo cuanto hay es racional y está ahí para algo bueno merced a una causa final. Si muchas cosas ocurrían por mera casualidad, la única manera de investigarlas era mirar y ver. Estratón, que tuvo cierta mano en la creación del Museo de Alejandría, admitía la posibilidad del vacío entre las partes de los elementos, con lo que la rarefacción y condensación se podía explicar inteligiblemente a costa de los espacios entre partículas. Esto dio lugar, a partir del siglo III a. C., a una tradición de experimentos y construcciones mecánicas. Empieza con Ctesibio, quien investigó la compresibilidad y presión de aire y la incompresibilidad del agua, desarrollando un órgano hidráulico que su mujer tañía con sensibilidad, asi como una catapulta de aire comprimido. Sus obras se perdieron, pero constaban de experimentos pneumáticos. Estos fueron proseguidos por Filón de Bizancio y, ya en nuestra Era, por Herón de Alejandría, cuya eolipila, una especie de turbina de vapor, fue muy conocida en el XVII, convirtiéndose en pieza obligada de cualquier gabinete que se preciara.

En pleno Renacimiento, el *ethos* neoplatónico dominó la actividad experimental, pues la alquimia y la magia eran la máxima expresión del arte práctico de personas activas. La magia fue modelo de experimentación porque sólo la actividad y operación manual puede abordar aquellas cosas que, según decía Cardano, los sentidos ven pero el intelecto no comprende. De entre la maraña de verborrea, repetición ritual y deseos de renacer espiri tual, se destacó una parte más modesta, la magia natural, que no era sino el arte de obtener efectos notables de causas sutiles. Un buen ejemplo de este arte se encuentra en los libros de la *Magia natural* de Porta, una colección de trucos y curiosidades de interés desigual que van del desenroscamiento de una arista de avena húmeda (que se hacía pasar por el movimiento mágico de una pata de araña egipcia) a las ilusiones ópticas y las lentes de aumento. Paulatinamente, la actitud activa del mago se fue deslindando de los aspectos morales y cósmicos del neoplatonismo para centrarse en la exploración de los efectos naturales bajo una vaga cobertura de simpatías a distancia, no por inmateriales menos medibles.

El padre de la filosofía experimental fue sin duda W. Gilbert, quien publicó en 1600 un libro, *De magnete*, que sirvió de modelo de esta actividad, aunque su importancia disminuyó con la entronización de Bacon por parte de la Sociedad Real de Londres durante los años sesenta. Gilbert, que ejerció la medicina en Londres, fue médico de Isabel I y del consejo para la salud de la armada cuando la amenaza española de 1588.

El magnetismo había recibido atención desde que los árabes introdujeran la calamita en la navegación por el Indico. En 1269, Pedro de Maricourt, apodado el peregrino, escribió una *Epistola de magnete* sobre la orientación de la brújula. Andando el tiempo, Colón descubrió durante un viaje que lo hizo famoso la declinación local (la diferencia entre el norte geográfico y magnético según los lugares), mientras que en 1634 Gellibrand descubrió la secular (la variación con el tiempo). En 1544 Hartman descubrió la inclinación magnética (la aguja pierde la horizontalidad progresivamente con la latitud), aunque sólo se conoció un cuarto de siglo más tarde por obra de Norman. En general, el comportamiento de la aguja aparecía conectado con el cosmos, pues señalaba el polo celeste, y se explicaba merced a influencias astrales a distancia. El mérito de Gilbert fue remitir el magnetismo a la Tierra, sin perder las conexiones cósmicas, permitiendo un estudio de laboratorio de sus fenómenos.

El primer libro del *De magnete* es un repaso histórico a cuanto se sabía sobre el imán, examinando exahustivamente sus propiedades bajo la hipótesis fundamental de que la Tierra misma es un inmenso imán. La segunda pieza básica del proceder de Gilbert fue la construcción de imanes esféricos, tierrecillas, como él las llama, que exhibían a escala manejable todos los fenómenos del magnetismo terrestre. De ese modo el magnetismo se tornó en un campo de estudio experimental. Los cinco libros siguientes se dedican a los cinco movimientos del imán: coito (atracción), dirección (orientación), variación (declinación), declinación (inclinación) y revolución (se suponía que un imán perfecto giraba espontáneamente).

En el tratamiento del coito, por ejemplo, se compara la atracción magnética con la triboeléctrica. Desde Tales, allá por el VII a. C., se sabía que el ámbar (*electron* en griego) frotado atraía pajitas y otros cuerpos livianos. Para identificar a los cuerpos que poseen esta propiedad, que Gilbert llama «eléctricos», inventó una especie de electroscopio, el *versorio* (figura 8.1.), que no es sino una agujita sensible que gira al acercársele un cuerpo cargado. Con él distinguía los cuerpos eléctricos de los magnéticos. Interpretaba los primeros como debidos a una causa material transitoria: el frotamiento expulsaba un efluvio del cuerpo que al retornar traía consigo cuerpos pequeños. El magnetismo, por el contrario, era permanente y se debía a una causa formal e inmaterial compartida por la Tierra y los imanes. Estas explicaciones teóricas son mucho menos interesantes que la variedad de experimentos realizados para refutar explicaciones alternativas (como que la atracción eléctrica se excite con el calor), o para estudiar las variaciones de las fuerzas atractivas, que son mutuas, según el tamaño, pu-

Figura 8.1.

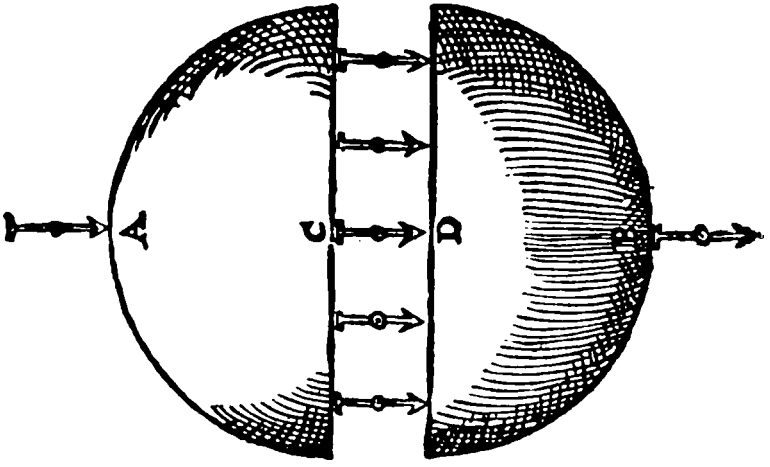


Figura 8.2.

reza o armadura de la piedra imán. El campo en que opera la acción magnética se llama orbis virtutis.

En el libro tercero sobre la orientación, se encuentran experimentos acerca de la magnetización del hierro en el campo u orbis virtutis de la Tierra, así como el estudio de las líneas de fuerza en tierrecillas (figura 8.2.). En el libro siguiente, se atribuye la declinación a la forma irregular del esferoide terrestre y a la consiguiente distribución irregular de las masas y de las impurezas, basándose para ello en experimentos con tierrecillas (figura 8.3.) y diseñando un instrumento matemático para medir la declinación. El libro quinto sobre la inclinación recurre asimismo al estudio de modelos de laboratorio mediante instrumentos matemáticos diseñados al efecto (figura 8.4.). Finalmente, en el último libro, toma la idea de Peregrino según la cual un imán puro y perfectamente esférico se alinea con los polos celestes y rota con ellos cada 24 horas. La aplicación de este fenómeno a la Tierra le confiere el movimiento diario (sin que nada se diga del anual) y conecta el magnetismo con la dinámica celeste sin esferas cristalinas que tanta influencia tuvo sobre Kepler.

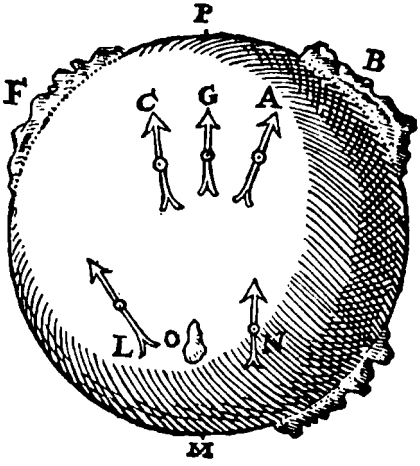


Figura 8.3.

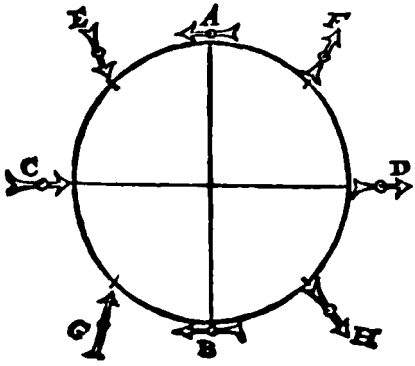


Figura 8.4.

La importancia de estas conexiones cosmológicas más la habilidad de Gilbert como matemático práctico e instrumentista convirtieron su libro en un modelo de cómo realizar experimentos exactos, bien descritos, repetibles y relevantes. Ya mencionamos su influencia sobre Kepler, así como que en Inglaterra fue el modelo de filósofo experimental antes de Bacon. Asimismo, su apelación a fuerzas cósmicas inmateriales que operan a distancia pervivieron hasta Newton, por más que entre tanto Descartes y sus secuaces construyesen explicaciones mecánicas en términos de un fluido de partícu-

las con rosca. Las fuerzas inmateriales sin causa mecánica (como la gravedad) se podían investigar matemáticamente, descubriéndose casi dos siglos más tarde que también seguían una ley inversa del cuadrado.

8.2. Los experimentos de los matemáticos

Otra de las tradiciones experimentales de comienzos del XVII está relacionada con la clave mecánica de la naturaleza. La matematización de problemas físicos relacionados con el movimiento de proyectiles, graves y máquinas se desarrolló en Italia en conexión con las inquietudes de los ingenieros mecánicos que bebían en la tradición de Euclides y Arquímedes, como se puede ver desde Benedetti y Tartaglia a Galileo.

Aunque los esfuerzos de éste se orientaban a elaborar sistemas deductivos axiomáticos, siguiendo el ideal de una ciencia demostrativa recogido en los *Segundos analíticos* de Aristóteles, muchos de los problemas abordados distaban de estar maduros para semejante tratamiento, por lo que en ellos predominó, siquiera sea vergonzantemente, el enfoque experimental. Esto puede verse en la primera Jornada de las *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias* (1638) de Galileo. Ya nos ocupamos en el Capítulo 5 de una de esas dos ciencias, la del movimiento local. La otra versaba sobre la resistencia de materiales, y para preparar su tratamiento discutió en dicha Jornada la causa de la cohesión.

Galileo tenía una concepción de la materia según la cual ésta constaba de partículas mínimas coordinables con los indivisibles que componen matemáticamente las magnitudes continuas. Desde una perspectiva mecánico-corpuscular, la reducción mecanicista de las cualidades debe huir del regreso infinito. Esto es, no se puede explicar el color apelando a corpúsculos coloreados, pues ello plantea de nuevo el origen del color en los corpúsculos. Por eso Descartes y Newton recurrían sea a la rotación de las partículas, sea a las bandas de interferencia en láminas delgadas atómicas. Así, cuando Galileo planteó la causa de la cohesión, no podía recurrir a un pegamento interatómico, pues ello entrañaría pedir una explicación de esa cola. La idea de Galileo era recurrir a la resistencia al vacío que muestra la naturaleza. Desde la Edad Media se sabía que dos placas de mármol pulimentadas se adhieren entre sí porque su separación entrañaría generar un vacío. Quizá ocurra lo mismo entre las partículas indivisibles que ofrecen una resistencia a crear vacíos entre ellas, explicando así la cohesión de los cuerpos sólidos. Galileo rechazó la sugerencia de Baliani de que ello pudiera deberse no a una misteriosa resistencia natural al vacío, sino a la presión del peso del aire, idea que, como veremos, dio lugar a toda una tradición de experimentos pneumáticos.

En cualquier caso, la visión corpuscular de Galileo produjo una buena cantidad de experimentos cuantitativos ingeniosos. Por ejemplo, a fin de

distinguir la cohesión de los cuerpos debida a los vacíos intercorpusculares de aquélla que pudiera deberse a otras causas, decidió medirla en un cuerpo cuyas partes estuviesen «sueltas», como ocurre en los líquidos, por lo que toda cohesión posible derivaría de la renuencia natural al vacío. La idea es tomar una columna de agua y colgarle un peso suficiente para romperla, que medirá la fuerza del vacío. En la figura 8.5., ABCD es un cilindro de vidrio y EFGH un pistón. Se invierte y llena de agua bajando el tapón I, cuidando de que no quede nada de aire. Se cierra luego la entrada, se invierte el aparato y se cuelgan pesos de K hasta la ruptura del cilindro. Repitiendo el experimento con un cilindro de otros materiales se computará qué parte de su cohesión se debe al vacío y cuál a otra causa. Este experimento explicaba la observación de los poceros de que las bombas de succión no pueden elevar agua a más de 10,5 m, pues el peso de una columna de esa longitud alcanza el límite de fractura del agua: la fuerza del vacío.

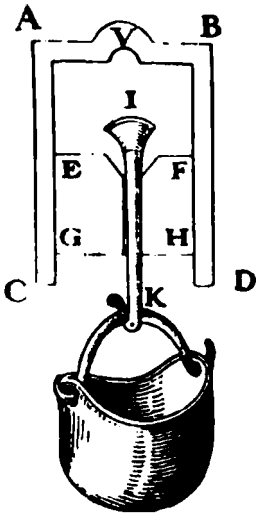


Figura 8.5.

Los detalles del aparato y del modo de proceder, así como las críticas a su funcionamiento, indican que debió de realizarlo, aunque no da resultados numéricos. Ello puede deberse a que para un matemático la ciencia es demostrativa, y hasta dar con un sistema axiomático, no tiene valor ofrecer mediciones experimentales. Así ocurre al menos con las mediciones de tiempos de caída y amplitudes de parábolas de que están llenos los manuscritos, aunque nunca aparecen en las obras impresas. También Arquímedes tenía un método mecánico de averiguar las relaciones antes de ofrecer una demostración rigurosa, abstracta y general. Esta actitud llevó en el pasado a creer que los de Galileo eran experimentos mentales o imaginarios, pero no era así. Algunos resultados estrambóticos no podían ser inventados, y al ser repetidos en nuestro siglo dieron la razón a Galileo. Por ejemplo, al discutir cuestiones de tensión superficial, interpretada como hostilidad entre al agua y el aire, Galileo ofreció el siguiente experimento. Si invertimos en el aire un globo lleno de agua con un agujero capilar, ésta no cae; pero si lo introducimos en un vaso de vino, éste ascenderá inmediatamente por el agua en finas hebras rojas, hasta que el agua esté en el vaso y el vino en el globo. Sabios hubo que ironizaron sobre la calidad del vino italiano cuando no sobre el uso que de él hacía Galileo. Sin embargo, en las condiciones indicadas, se

da un flujo laminar y no turbulento, por poco intuitivo que ello sea; es pues un experimento real.

Hay muchísimos otros experimentos ingeniosos, como los que venían a resolver el viejo problema de pesar el aire *en* el aire. Por ejemplo, se toma un frasco con una válvula en la boca. Se llena todo lo posible de agua sin que salga nada de aire, lo que reducirá fácilmente su volumen original a un tercio. Se pesa el conjunto y luego se deja escapar aire hasta que se reduzca a la presión normal, pesándolo de nuevo. La diferencia es el peso del aire escapado, de volumen igual al del agua.

Además de los experimentos recogidos en esta Jornada, Galileo realizó durante su vida un sinnúmero de experiencias y ensayos instrumentales con sus inventos ópticos, el telescopio y el microscopio. También inventó un termoscopio, un cronómetro de péndulo y muchos otros dispositivos que aplicaba inmediatamente con ingenio. Ya dijimos que su concepción geométrica de la ciencia le impidió desarrollar una perspectiva experimentalista que se contentase con medir patas de mosca; pero, como veremos, su influencia sobre sus discípulos experimentadores fue enorme. También Newton era un matemático «dogmático» en su deseo de demostrar firmemente la verdad, que estaba encontrada con la perspectiva escéptica de muchos colegas de la Sociedad Real. Sin embargo, su extraordinaria habilidad experimental manifiesta en la *Optica* lo convirtieron en una podersoa fuente de inspiración para los experimentadores dieciochescos.

Un seguidor de los experimentos de Galileo, aunque con una filosofía experimentalista, fue el fraile mínimo Mersenne. Heredero de las tendencias escépticas del XVI francés, desconfiaba del dogmatismo de los matemáticos, quienes querían hallar la verda. Sólo Dios conoce la esencia de las cosas, y dado que su omnipotencia puede producir los efectos visibles con múltiples medios, de la observación de los fenómenos no es posible llegar a la causa. La única ciencia para el hombre es la de los detalles cuantitativos de los fenómenos merced a la experimentación. De acuerdo con ello, sometió a la ciencia del movimiento de Galileo a crítica experimental con precisión e ingenio (por ejemplo, para medir el tiempo, sustituía los cubos de agua agujereados de Galileo por coros de frailes entrenados en la correcta medición de compases musicales que cantaban mientras oscilaban los péndulos). Pero donde la filosofía experimental fraguó con más fuerza fue en las modernas academias científicas.

8.3. Bacon y las Academias

Las contribuciones de Bacon a la ciencia fueron exiguas y no se pueden comparar a las de Gilbert, por no hablar de las de Galileo; pero elaboró una filosofía adecuada a la exploración experimental en los campos no matemá-

ticos tratados de manera práctica en las artes y técnicas, tal como señalamos en el Capítulo I. Su influencia fue enorme en la organización colectiva de estas indagaciones, y no sólo en Inglaterra. Las primeras academias científicas acusaron su espíritu en la investigación de los fenómenos de la combustión, el calor y el frío, la construcción y el transporte, los vientos y los meteoros, etc. que no podían soñar con un tratamiento teórico serio sin recopilar antes un acervo considerable de lo que hacía la naturaleza en esos terrenos.

La primera sociedad científica fue la florentina *Accademia del Cimento* o del experimento (1657-67), formada por discípulos de Galileo. Pero apenas trabajaron sobre temas galileanos, como hicieran Mersenne o Riccioli, tal vez porque el ambiente papista no permitía tocar temas con implicaciones cosmológicas. Su eslogan, *provando e riprovando*, traiciona una actitud exprimentalista y ateórica quizá sólo por conveniencias. Su objetivo parece ser el descrédito del aristotelismo más que el desarrollo de un programa propio sobre el que, en cualquier caso, guardaron silencio. Los *Ensayos de experiencias naturales* (1666) recogen una muestra de los experimentos realizados con todos los medios materiales e instrumentales, omitiendo toda discusión: los hechos hablaban baconianamente por sí solos.

La mayor parte de los experimentos versaban sobre frío y congelación natural y artificial, así como sobre las variaciones de volumen. Otros se ocupaban del barómetro, el vacío y la presión del aire, o sobre el imán y el ámbar. otros se dirigían a refutar la ligereza absoluta, y otros trataban de los cambios de color de líquidos o del movimiento del sonido y de los proyectiles. No se ve ningún orden o progreso hacia ninguna conclusión. A pesar de su difusión escasa, los *Ensayos* no carecieron de influencia, como por ejemplo sobre Musschenbroek, quien junto con Boerhaave y 'sGravesande convirtió a Leiden en el centro de la física experimental en la primera mitad del XVIII.

La influencia de Bacon sobre los fundadores de la Sociedad Real londinense (1662) fue explícita y extrema. El alma de esta tendencia, tan opuesta al mejor de sus miembros, Newton, fue el prudente y premioso Boyle, quien confesó haber abandonado la lectura de Descartes para que su ingenio no interfiriera con la «lectura» directa de la naturaleza. A su muerte dejó tal cúmulo de observaciones y experimentos sin teorías que los espíritus geométricos contienentales cono Spinoza, Leibniz y Huygens se hacían cruces ante la torpeza intelectual de un hombre que no había sacado nada en limpio de tanta experiencia sofisticada y cuidadosa. Ellos no eran baconianos. El curator de experimentos de la Sociedad Real, Hooke, era de espíritu más geométrico y cartesiano (a él se debe en gran medida la ley llamada de Boyle). El sólo fue responsable de la ejecución de la mayoría de los experimentos hechos en la Sociedad, realizados en su mayoría con un equipo experimental diseñado cuando no fabricado por él. En conexión con los

fabricantes de instrumentos de Londres, construyó cuadrantes, telescopios, microscopios, barómetros, termómetros, higrómetros, refractómetros, autómatas, etc. La sola mención de sus invenciones, investigaciones y doctrinas, algunas de las cuales pueden verse en su *Micrografía* (1665), excederían nuestros límites.

La Academia Real de Ciencias de París (1666) también recibió el influjo de Bacon en el campo de la ciencia natural. Sus mayores esfuerzos se centraron en la confluencia de las matemáticas con la ingeniería para fines aplicados geodésicos, realizando costosas expediciones y experimentos matemáticos para determinar las coordinadas de Uraniborg o medir la longitud de un grado de meridiano, para lo cual desarrollaron notablemente la construcción de instrumentos astronómicos y geodésicos precisos. Pero además de la división de *matemáticas*, que englobaba geometría, astronomía y mecánica, había otra de *física* a la que pertenecían las secciones de química, anatomía y botánica, menos dirigidas por doctrinas generales y más entregadas a la exploración experimental. La profesión de físico y matemático eran tan diversas que en 1699 el Secretario Bignon, a fin de mantener el silencio en las reuniones conjuntas de los miércoles, sentaba alternativamente a físicos y matemáticos.

Inicialmente el trabajo de los físicos era más bien errático, explorando el mundo con cada nuevo juguete. Si tenían una bomba de vacío, metían cualquier cosa en la campana, petardos o gorriones, a ver qué pasaba; si se ponían a destilar, no se arredraban ante nada: en una ocasión destilaron un melón, obteniendo un líquido frustrantemente insípido; en otra se lanzaron sobre un saco del mejor café con resultados parecidos. Más suerte tuvieron con la destilación de 40 (cuarenta) sapos, que produjo un licor deliciosamente picante.

Las cosas mejoraron paulatinamente, y para 1785 se creó una nueva sección de física experimental adscrita a la sección de matemáticas, quedando en la vieja división de física los temas refractarios a tratamiento matemático, como química, botánica, anatomía comparada y embriología. Otro tanto ocurrió en la Academia de San Petersburgo, donde la física experimental (electricidad, magnetismo, calor, óptica e hidráulica) se unió a las matemáticas. Tras largos esfuerzos, esas áreas naturalistas habían empezado a mostrar generalizaciones susceptibles de tratamiento matemático, por lo que la vieja división entre matemáticas y física dejó de tener mucho sentido, sustituyéndose más bien por la división entre física (en sentido actual) y biología (término acuñado por Lamarck en el XIX).

8.4. La fabricación del vacío

Los experimentos penumáticos del XVII son un buen ejemplo de confluencia de intereses de matemáticos y experimentalistas, de explicación

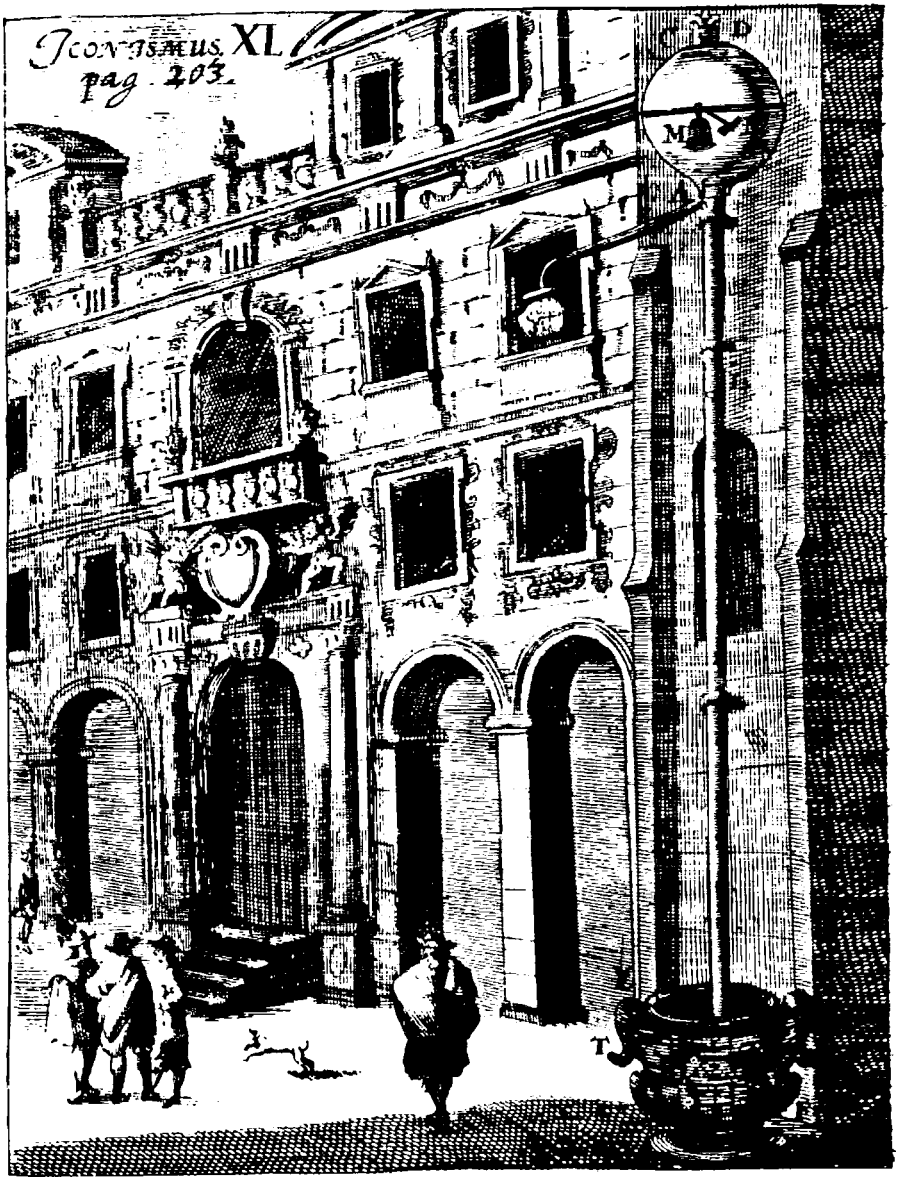


Figura 8.6. El experimento de Berti en Roma, comunicado por el P. E. Maignan y publicado por G. Schott.

teórica de un campo nuevo y de su desarrollo o creación mediante instrumentos nunca vistos y efectos inesperados.

Aludimos ya al conocimiento artesanal de la imposibilidad de las bombas de succión de elevar agua por encima de los 10,5 m, hecho que Galileo interpretaba como medida de la fuerza del horror de la naturaleza al vacío, frente a la sugerencia de Baliani de que se debía a la presión del peso del aire. A principios de los años cuarenta, unos discípulos de Galileo, Berti y Magiotti, realizaron en Roma un experimento espectacular consistente en llenar de agua un sifón de plomo de unos 13 m, con la parte superior de vidrio (figura 8.6.). Al abrir la espita inferior, el agua descendía hasta la altura adecuada, dejando arriba un espacio aparentemente vacío al que acudían cientos de burbujitas del agua. Obviamente, aristotélicos y cartesianos objetaron que dicho espacio no podía estar vacío, puesto que transmitía la luz (e incluso el sonido cuando no se cuidaba que la campana no estuviese en contacto con el vidrio).

Inmediatamente después, otro discípulo de Galileo, Torricelli, siguiendo una sugerencia de Maggiotti de usar agua marina, más densa que la dulce, para acortar el engorroso dispositivo, tuvo la buena idea de llevar las cosas al extremo y usar mercurio, el líquido más denso, catorce veces más que el agua, con lo que la columna sostenida por la atmósfera sería de 75 cm en vez de 10,5 m (figura 8.7.). Incluso pretendió estudiar el groso y sutileza del «mar de aire» en que nos hallamos sumergidos a través de las variaciones en la altura del mercurio (el aparato sería entonces un barómetro); pero su sensibilidad a la temperatura indicaba que el supuesto espacio vacío se comportaba como si en realidad estuviese lleno de aire, con lo que se abría un amplio campo a la realización y refinamiento de los experimentos.

La «experiencia barométrica» llegó pronto a Francia, despertando el interés del joven Pascal, así como de Mersenne y Roverbal. En Rouen había excelentes vidrieros que soplaron para Pascal tubos de longitud tal que despertaron la incredulidad de Boyle, con los que fustigó a los enemigos del vacío. El propio Descartes, que acabó realizando mediciones barométricas en Suecia, sugirió al parecer la idea de realizar un experimento crítico, consistente

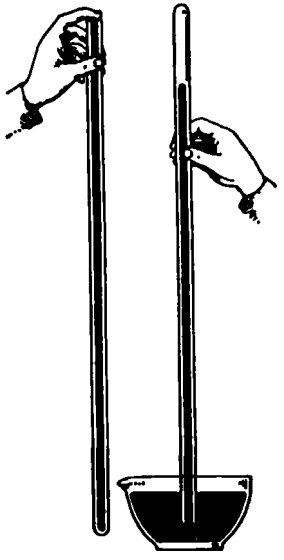


Figura 8.7.

en modificar la variable independiente, el peso de la atmósfera, para ver cómo respondía la columna de mercurio. La única manera de hacerlo era subir hacia la superficie del «mar de aire», encaramándose a una buena montaña. Pascal no debía ser muy deportista, pues en 1648 convenció a su cuñado Périer para que ascendiera el Puy de Dôme (1.464 m) con un tubo de Torricelli a cuestas. La columna de mercurio caía debidamente con el ascenso. A partir de entonces Auzout y Roverbal realizaron en Paris diversos experimentos. Este último diseñó uno muy bonito con una vejiga de carpa desinflada que se hinchaba al invertir el tubo y fabricar un vacío (figura 8.8.). Ello ponía de manifiesto una propiedad del aire, la elasticidad, que le hacía llenar por completo cualquier espacio y que capturó la imaginación de los ingleses más que el tema del vacío, pero no se pudo explotar hasta que no se superaron los engorros límites de un tubo de Torriceli.

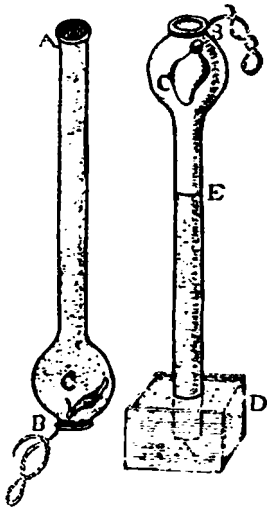


Figura 8.8.

Pero antes de eso, Pascal, que era un excelente matemático, al ver que todo el tinglado se debía a un equilibrio entre pesos, como si estuviesen en los platillos de una balanza, remitió la cuestión a la estática e hidrostática, ciencias matemáticas desde los tiempos del buen Arquímedes, por lo que renunciando a la exploración errática de novedades, compuso a partir de 1654 dos obras más demostrativas que baconianas, el *Tratado sobre el equilibrio de los líquidos* y el *Tratado sobre el peso de la masa de aire*. En ellos, un poco como Galileo, no da detalles de la realización de los experimentos, sino que men ciona los resultados con vistas a la demostración de tesis teóricas, ofreciendo incluso en ocasiones pruebas «que sólo los geómetras podrán seguir» y acabando algunos argumentos con el rotundo Q. E. D. (quod erat demonstrandum) de los tratados matemáticos. (Dicho sea de paso, calculó el peso de la atmósfera en unos 4.000 billones de toneladas.)

Todo esto no le gustaba nada a Boyle, mal avenido con la geometría y dispuesto, como Bacon, a «morar casta y perpetuamente entre las cosas mismas sin apartar de ellas la vista». Se quejaba este *virtuoso* cristiano de que Pascal no afirmase realmente haber hecho los experimentos, no diese detalles que permitiesen repetirlos y usase en ellos tubos y equipos de tamaño desmesurado que él no podía encontrar en la tienda de la esquina. Para más

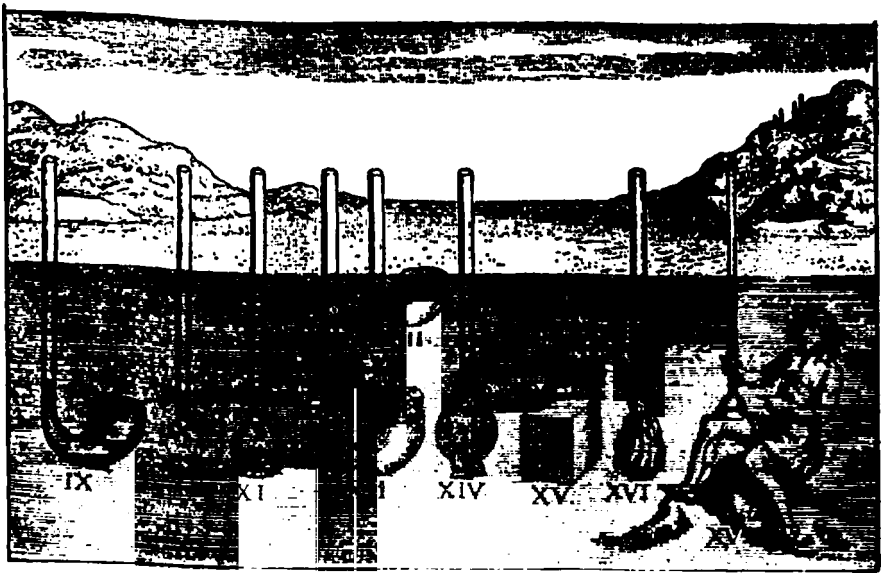


Figura 8.9.

afrenta estaba el ciudadano de la figura 8.9. que realizaba experimentos sentado indolentemente en una roca bajo el agua con un tubo sobre el muslo. soportando estoicamente una dolorosa tumefacción. Boyle, que sabía lo difícil que era medir la altura del mercurio tras los burdos vidrios de su equipo. no podía soportar que alguien tratase de hacerle creer en la fiabilidad experimental de semejante Neptuno. Y quien miente una vez...

El *estilo experimental* de Boyle estaba en las antípodas del *estilo geométrico*. Mal matemático y escéptico prudente, le interesaba mostrar las obras de la naturaleza, para lo que inventó el género del informe experimental creíble y comunicable. En sus *Nuevos esperimentos físico-mecánicos sobre el resorte del aire* (1660) encontramos una larga serie de pruebas minuciosas hasta el tedio y con tan escaso alarde de imaginación o ingenio, que de ellas se puede decir cualquier cosa menos que su autor no las hiciera como dice. Más que *demostrar* nada, *muestra* los hechos mismos. Entre los logros de Boyle está el haber contratado como ayudante de laboratorio a un joven prometedor de quien se dijo (falsamente, *hélas*) que había tenido por única amante a la geometría. Era Robert Hooke. Hizo dos cosas.

En primer lugar, fabricó versiones muy mejoradas de la bomba de vacío (figura 8.10.). La primera bomba (1647) de von Guericke no era más que una bomba de succión: un cilindro con un pistón y un par de válvulas, construida para contrastar la doctrina cartesiana de la equivalencia entre mate-

ria y extensión. Con ella hizo el vacio en barriles de agua que se rompían. Más tarde utilizó una esfera de bronce de la que bombeó directamente el aire, observando cómo colapsaba, lo que apoyaba la idea de Descartes de que sin cuerpos no hay extensión. Finalmente tuvo éxito en 1657 con el

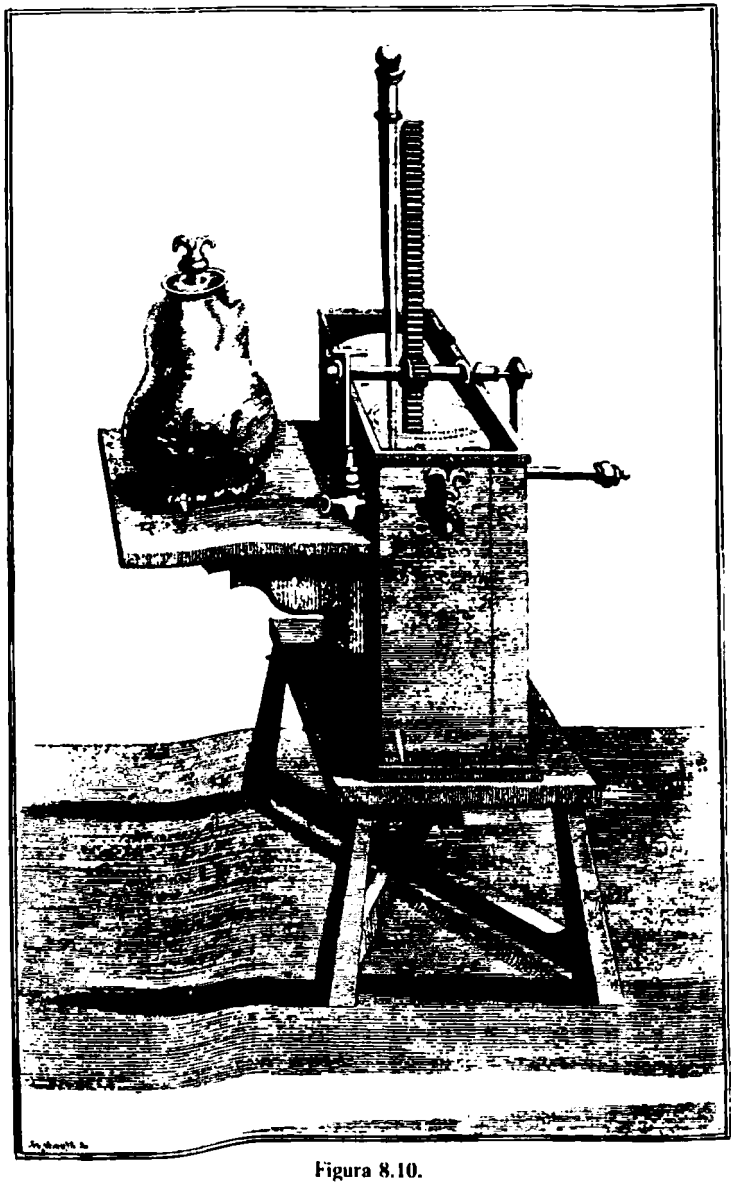


Figura 8.10.

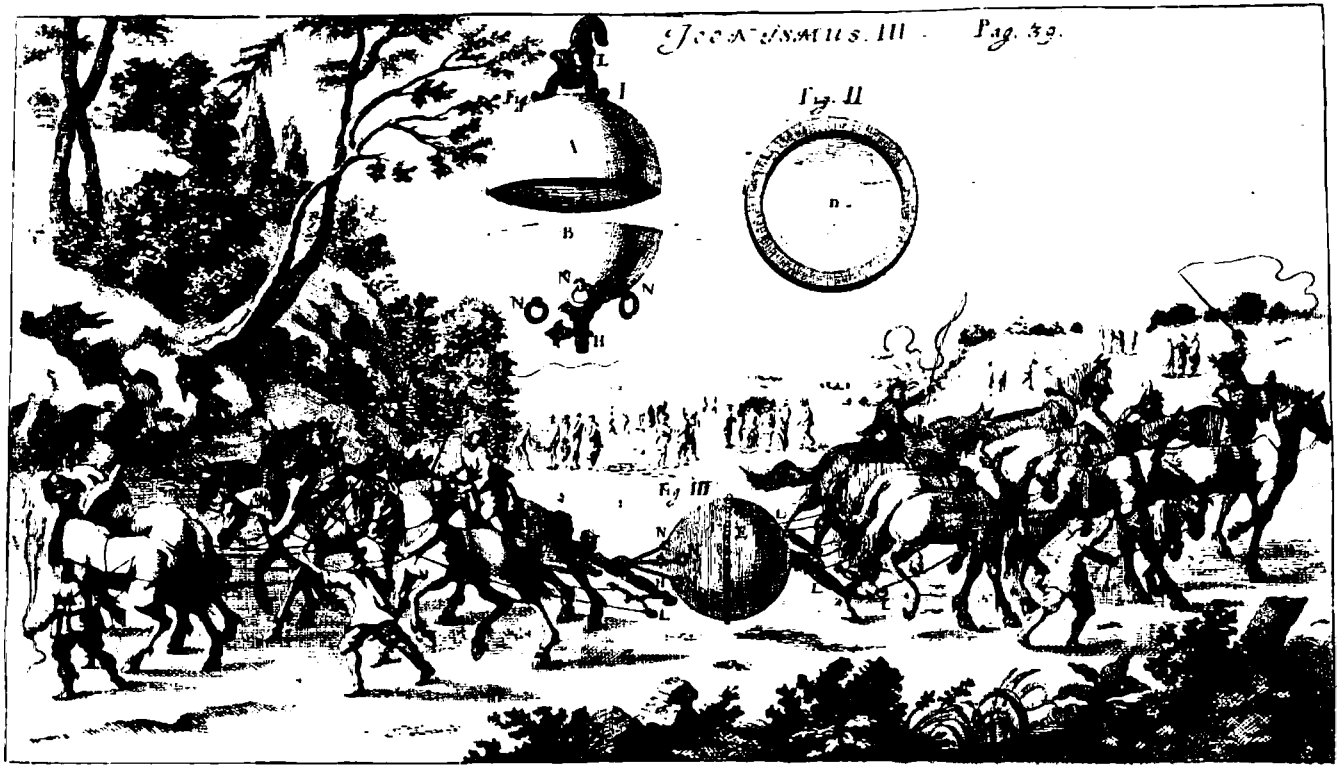


Figura 8.11.

famoso experimento de Magdeburgo (figura 8.11.): construyó dos hemisferios de bronce más fuertes que, una vez vaciados de aire, no sólo no colapsaron, sino que se precisó la noble fuerza bruta de dos tiros de caballos para separarlos. Al mejorar ahora el mecanismo de bombeo y la estanqueidad del sistema, y al diseñar recipientes operables, Hooke abrió un nuevo continente a los exploradores de la naturaleza.

En segundo lugar, insufló por una vez un poco de espíritu geométrico en la economía experimental y mental de Boyle, quien produjo así un resultado decente al menos una vez en su vida. Ya mencionamos la espectacular manifestación de la elasticidad del aire en el experimento de Roverbal de la vegija. Asimismo, von Guericke, que había hecho inicialmente el vacío bombeando agua, cuando pasó al aire seguía succionando desde la parte inferior del recipiente, como si el aire fuera un líquido, hasta que terminó reconociendo la curiosa propiedad del aire de llenar todo el espacio, bombeando entonces desde cualquier posición.

Boyle estudió esta propiedad en los *Nuevos ensayos* de 1660, cosa que hizo con gran diversidad, beneficiándose de la bomba diseñada por Hooke. Demostró brillantemente la función del aire en los experimentos torricellianos, en la transmisión del sonido, en la respiración y combustión, etc. En uno de ellos trató de ver qué pasaba con un barómetro en el vacío (figura 8.12.). Encerró un tubo de Torricelli en la campana y comprobó que la altura de mercurio descendía con cada cilindrada de aire extraído. En primer lugar, en este experimento se prescindía del peso de la atmósfera. Este había comprimido el aire inicial de la campana, pero una vez encerrado en ésta lo que contaba era su elasticidad. En segundo lugar, no podía saber cómo dependía la elasticidad (medida mediante el barometro) de la rarificación, pues las sucesivas cilindradas extraían cantidades diversas de aire, por lo que Boyle no llegó a ningún resultado. Pero dos años más tarde, en la segunda edición, demostró la famosa ley de Boyle gracias a una conjetura de Towneley, según la cual la elasticidad es inversa de la expansión, debidamente probada mediante dos experimentos diseñados y realizados por Hooke. En el primero de ellos, se encerraba un volumen de aire a presión normal (una atmós-

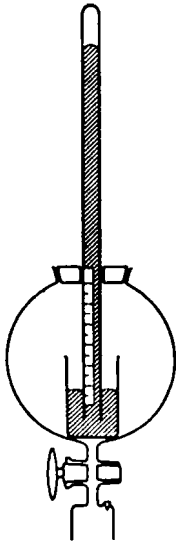


Figura 8.12.

fera ó 75 cm de mercurio) en el brazo corto de un sifón (figura 8.13. a), y se vertía mercurio por el extremo abierto, *a*, midiendo directamente la contracción del aire (la altura del cilindro *cd*), e indirectamente su elasticidad, igual a los 75 cm de mercurio en *b*. Ambas magnitudes resultaron inversamente proporcionales: v.g., cuando *cd* era ½ del volumen inicial, *ba*, era 75 cm, que más los 75 cm de la presión atmosférica significan el doble de la presión inicial; y así para los demás valores.

Para el aire dilatado el experimento era distinto (figura 8.13. b). En él, una pulgada de aire a presión ordinaria, *ab*, se dilataba al extraer el tubo pequeño del grande lleno de mercurio. Así, la elasticidad del aire dilatado, *ab*, más el peso de *bc* igualaban la presión atmosférica, con lo que ésta *menos bc* daba la elasticidad decreciente del aire (una idea de Towneley y Power). En efecto, cuando *ab* se dobla, esa diferencia se reduce a la mitad (figura 8.14.).

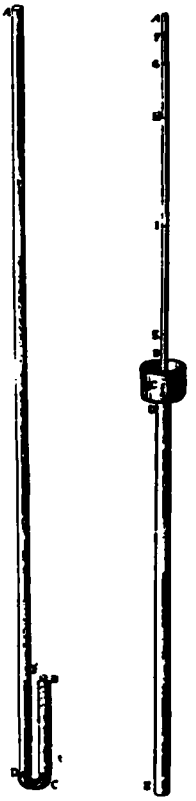


Figura 8.13.

De esta manera, la exploración baconiana se alternó con el espíritu geométrico, dando lugar a la primera ley funcional en física. Mientras que por un lado el holocausto de bestezuelas en la campana arreció con la difusión de la máquina pneumática, por otro las mentes más teóricas ingeniaban modelos explicativos a base de fluidos corpusculares. Ya mencionamos la teoría cinética de Hooke en que la presión está constituida por impactos de corpúsculos vibrantes cuya frecuencia aumenta al disminuir el espacio. También Newton demostró en el Libro II de los *Principia* que un fluido cuyas partículas se repelen con fuerzas que terminan en las vecinas y que sean inversas de la distancia, obedecerá la ley de Boyle. Naturalmente esto es un constructo matemático, restando por ver si sus condiciones de fuerza se dan en el mundo físico. En cualquier caso, mientras los baconianos jugaban con sus cacharros, los matemáticos trataban de integrar las nuevas propiedades bajo el cetro de la ciencia matemática.

El barómetro fue una derivación útil de la pneumática que dio pie a

A table of the rarefaction of the air.

A. The number of equal ſpaces at the top of the tube, that contained the ſame parcel of air.

B. The height of the mercurial cylinder, that together with the ſpring of the included, air counterbalanced the preſſure of the atmoſphere.

C. The preſſure of the atmoſphere.

D. The complement of *B* to *C*, exhibiting the preſſure ſuſtained by the included air.

E. What that preſſure ſhould be, according to the hypotheſis.

A	*B*	*C*	*D*	*E*
1	$00\frac{0}{2}$	Subtracted from $29\frac{3}{4}$ leaves	$29\frac{3}{4}$	$29\frac{1}{4}$
$1\frac{1}{2}$	$10\frac{3}{8}$		$19\frac{1}{8}$	$19\frac{5}{8}$
2	$15\frac{3}{8}$		$14\frac{3}{8}$	$14\frac{7}{8}$
3	$20\frac{2}{8}$		$9\frac{4}{8}$	$9\frac{15}{32}$
4	$22\frac{5}{8}$		$7\frac{1}{8}$	$7\frac{7}{16}$
5	$24\frac{1}{8}$		$5\frac{5}{8}$	$5\frac{19}{32}$
6	$24\frac{7}{8}$		$4\frac{7}{8}$	$4\frac{27}{32}$
7	$25\frac{4}{8}$		$4\frac{2}{8}$	$4\frac{1}{4}$
8	$26\frac{0}{8}$		$3\frac{6}{8}$	$3\frac{23}{32}$
9	$26\frac{1}{8}$		$3\frac{5}{8}$	$3\frac{11}{16}$
10	$26\frac{6}{8}$		$3\frac{0}{8}$	$2\frac{39}{40}$
12	$27\frac{1}{8}$		$2\frac{5}{8}$	$2\frac{33}{48}$
14	$27\frac{4}{8}$		$2\frac{2}{8}$	$2\frac{1}{8}$
16	$27\frac{6}{8}$		$2\frac{0}{8}$	$1\frac{35}{64}$
18	$27\frac{7}{8}$		$1\frac{7}{8}$	$1\frac{47}{72}$
20	$28\frac{0}{8}$		$1\frac{6}{8}$	$1\frac{9}{80}$
24	$28\frac{2}{8}$		$1\frac{4}{8}$	$1\frac{23}{96}$
28	$28\frac{3}{8}$		$1\frac{3}{8}$	$1\frac{1}{16}$
32	$28\frac{4}{8}$		$1\frac{2}{8}$	$0\frac{211}{128}$

Figura 8.14.

desarrollos instrumentales nuevos y a un campo virgen de observaciones y programas baconianos de recogida de datos meteorológicos, cuyo estudio terminó llevando a Dalton, una persona habituada a considerar los fenómenos empíricos desde una perspectiva matemática, al estudio de la atmósfera y a la formulación de la moderna teoría atómica en los albores del siglo pasado.

La alternancia de enfoques baconianos y matemáticos podría ejemplificarse en muchos otros campos, lo que nos adentraría en el XVIII. Especialmente la electricidad exhibió esta mezcla de exploración gozosa y teorización. Los «electricistas» montaban exhibiciones circenses, como la venus eléctrica, una garrida moza rococó electrizada que ofrecia al público besos «chocantes», o como la aplicación en plaza pública de una batería de botellas de Leiden (condensadores) a un corro de frailes agarrados de la mano, al parecer con notable efecto. Pero, a la vez, los geómetras acechaban la oportunidad de hincar el diente a las nuevas tierras arrancadas a los arcanos naturales, como en la demostración de que la fuerza eléctrica seguía una ley newtoniana inversa del cuadrado. El caso de la química, no obstante, siguió un patrón distinto, como veremos a continuación.

9. La filosofía química y la estructura de la materia

9.1. La alquimia

La química moderna nació en la segunda mitad del siglo XVIII. Hasta entonces, las diversas operaciones que hoy adscribimos al dominio de la química no se aglutinaron definitivamente en una disciplina científica con entidad propia. Procedían de áreas entonces tan dispares como la minería y la metalurgia, la industria de los colorantes, la farmacia o la alquimia. Como trasfondo a todas ellas, y ejerciendo mayor o menor influencia, siempre existió alguna teoría sobre la constitución de la materia.

9.2. La materia en Aristóteles

La teoría de la materia de Aristóteles, tal como se apuntó en el Capítulo 2, se basaba en los cuatro elementos (tierra, agua, aire y fuego), constituídos a partir de pares de cualidades opuestas, y por sus transformaciones entre sí a partir de sucesivos cambios de cualidad, al compartir cada uno de ellos con los demás una cualidad común. También, en combinación con lo anterior, Aristóteles distingue la presencia de dos exhalaciones que, emanando del interior de la Tierra, dan lugar a todos los cuerpos minerales cuando son aprisionadas en su interior. Una de estas exhalaciones es humeante, y por tanto posee cualidades calientes y secas; la otra es vaporosa, y las posee frías y húmedas. Los metales, por ejemplo, se forman con un predominio de esta última.

Estas ideas, aunque de hecho bastante más elaboradas de lo que da a entender la breve síntesis que aquí se expone, quedaban por detrás de los

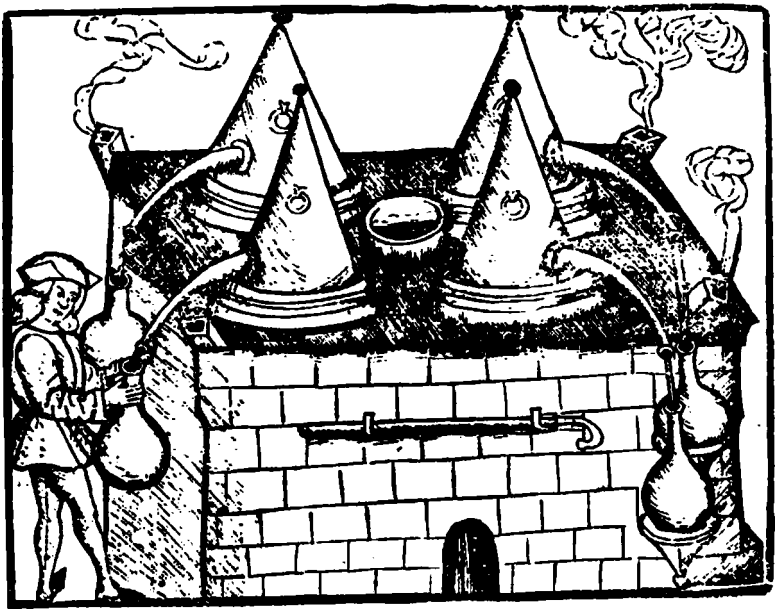


Figura 9.1. Horno de destilación. De Hieronymus Brunschwig. *Das Buch der rechten Kunst zu distillieren* (1500).

logros de la tradición tecnológica en el campo de los colorantes o en el trabajo del vidrio, la arcilla o los metales. Se trataba esta última de una actividad artesanal, desprovista de contexto teórico y orientada hacia la consecución de buenos resultados mediante la aplicación de recetas cuyo secreto, en muchos casos, era celosamente guardado. Un campo concreto que conoció bastante actividad fue el de los metales y las piedras preciosas: reconocido su valor, los falsificadores pusieron pronto en el mercado toda una gama de productos que se les asemejaban hasta tal punto que en muchos casos no podían distinguirse de los originales con los métodos disponibles en la época.

El foco cultural que constituyó Alejandría permitió un primer contacto entre las especulaciones teóricas y los conocimientos prácticos, bajo un clima que participaba de ideas mágicas y místicas. De la fusión de todo ello nació la alquimia. La idea básica de los alquimistas, a la luz de las concepciones aristotélicas, consiste en que es efectivamente posible la obtención de oro mediante la transmutación de otros metales menos nobles. Así, el producto final de las técnicas metalúrgicas, que hoy diríamos que sólo se parece al oro, comienza a considerarse como una cierta forma del oro, no todo lo pura que sería deseable. Si la naturaleza, a partir de las exhalaciones que se forman en el interior de la Tierra, puede crear los metales y, tal como se

creía, hacerlos evolucionar con el tiempo hacia su forma más perfecta, el oro, parecía en principio posible duplicar y aun acelerar ese proceso, desposeyendo de sus cualidades al material original con el fin de reducirlo a su materia prima, para entonces imprimirle las cualidades del oro.

Esta idea básica estaba permeada por la creencia astrológica de que el macrocosmos influía en el microcosmos, y por la aplicación de algunos elementos de la filosofía estoica. Los alquimistas creían en la existencia de «espíritus» activos responsables del cambio y de la configuración de la materia. Así, su labor consistía en «matar» el material original y luego vivificarlo y conformarlo como oro mediante la acción de estos «espíritus» extraídos de distintos materiales.

Para llevar a cabo la obra era preciso desarrollar una buena dotación de instrumentos, métodos y reactivos. El alambique para la destilación y el procedimiento conocido como «baño María» tienen origen alquímico.

La alquimia helenística decayó cuando en ella comenzaron a predominar demasiado los elementos mágicos y místicos en detrimento del trabajo de laboratorio. Conviene subrayar que los primeros no estuvieron en absoluto desprovistos de importancia; en el contexto neoplatónico, la otra cara del proceso de transformación de los metales bajos en nobles la constituía un proceso paralelo de transformación, de «ascesis» o renacimiento que sufría el propio alquimista. Por ello la alquimia no sólo constituía una «ciencia pura», sino también una mística y una ética.

Esta tradición fue recogida por el mundo árabe, en donde conoció una nueva etapa de esplendor, aunque sus supuestos de partida continuaron siendo prácticamente los mismos. Un concepto nuevo es el de «elixir», una substancia capaz de actualizar las cualidades latentes en el metal para así convertirlo en oro; la influencia de la alquimia china hizo crer también en la existencia de un elixir capaz de otorgar, si no la inmortalidad, cuanto menos la salud y una larga vida. En relación con la elaboración de estos elixires, se prestó atención a la destilación de substancias animales y vegetales. De este modo fue creciendo el número de compuestos conocidos, que también se vieron incrementados por el descubrimiento de algunos ácidos minerales. Otra novedad es la creencia de que los metales estaban constituídos por el azufre y el mercurio (considerados más como principios que como elementos reales), a los que se atribuía cualidades opuestas.

La alquimia árabe acabó, como la helenística, impregnada de elementos ocultistas y místicos. Y cuando alcanzó el occidente cristiano se repitió nuevamente el proceso, sin que se diesen avances de gran significación. Las principales aportaciones de la alquimia a la química moderna residen fundamentalmente en el desarrollo de instrumentos y procedimientos de laboratorio, y en el descubrimiento de una gran variedad de compuestos químicos. Los objetivos específicos buscados por los alquimistas, sin embargo, no permitieron que dichas substancias se estudiasen por sí mismas.

9.3. Paracelso y la química médica

Cuando, ya en el siglo XVI, había muchos que no creían que el alquimista pudiese alcanzar a transmutar los metales en su laboratorio o lograr la longevidad, surgió una nueva propuesta. Desde la medicina, Paracelso (1493-1541) redefinió la alquimia como aquélla disciplina en la que las materias primas naturales eran elaboradas con vistas a una nueva finalidad. La más importante de estas finalidades era para él la preparación de medicinas específicas.

Hasta el momento, la doctrina médica predominante había sido la de Galeno. Como es sabido, éste defendía la existencia en el cuerpo de cuatro humores (sanguíneo, melancólico, colérico y flemático) cuyo desequilibrio motivaba la enfermedad. Paracelso defendió en cambio que las enfermedades tenían su causa en agentes externos que se asentaban en órganos específicos del cuerpo, y consistían en reacciones químicas que se producían en él. Este nuevo concepto de enfermedad requería nuevos métodos terapéuticos; así, junto a los tradicionales fármacos de origen vegetal, introdujo remedios específicos de origen mineral, aplicados bajo principios homeopáticos.

Hallando su base en una reforma radical de la medicina, las doctrinas de Paracelso tenían un alcance mucho mayor. Elaboró toda una filosofía química de la naturaleza. La misma creación se veía como un proceso de separación química. Al mismo tiempo, su universo alquímico tenía carácter mágico. Nos referimos aquí a la magia natural, a la creencia de que en todos los cuerpos y fenómenos de la naturaleza subyace la acción de espíritus y fuerzas ocultas, cuyo conocimiento no se puede lograr en las obras de los clásicos, sino a través de una atenta observación del mundo que nos rodea.

En consonancia con lo anterior, Paracelso también introdujo nuevas ideas sobre la materia, bastante complejas, de las que sólo podremos dar aquí un ligero esbozo. Mantuvo los cuatro elementos clásicos, tierra, agua, aire y fuego, pero desposeyéndolos de su carácter fundamental, que otorgó a una materia primera, el mysterium magnum, de la cual procedían. Dio a estos elementos un carácter espiritual (por tanto eran inexistentes en la naturaleza) y los concibió como «madres» de los objetos. Por ejemplo, la tierra era la madre de todos los cuerpos terrestres, incluido el hombre.

Junto a estos cuatro elementos, alineó tres principios, la tria prima: el azufre, el mercurio y la sal, que venían a constituir una extensión y generalización de la antigua teoría islámica del azufre-mercurio para los metales. Pero estos principios no eran materiales en modo alguno. Se trataba más bien de arquetipos de cualidades que asumían los cuerpos gracias a la acción de un conjunto de fuerzas espirituales. Dicho conjunto de fuerzas era el verdadero responsable de la diversa constitución de la materia que forma los cuerpos que nos rodea. La sal es el principio responsable de la

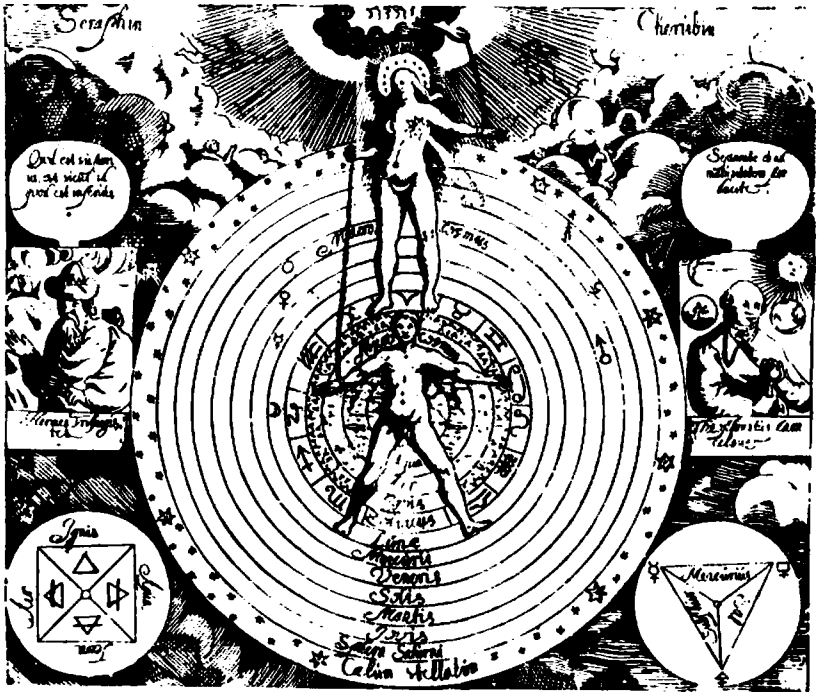


Figura 9.2. El grabado representa el vínculo entre el hombre y su creador a través de la cadena de la naturaleza, representada por una joven. Hermes se ha dibujado a la izquierda, y Paracelso a la derecha. Abajo, a la izquierda, se representan los cuatro elementos y, a la derecha, los tres principios. De Tobias Schütz, *Harmonia macrocosmi cum microcosmi* (1654).

solidez y el color; el azufre, de la combustibilidad; y el mercurio, de la cualidad vaporosa y fluida. Esta concepción, sin embargo, no podía constituirse en la base de un sistema analítico. Los distintos cuerpos no se distinguían entre ellos por una diversa composición de estos principios o cualidades; en realidad, tales principios eran distintos para cada cuerpo. Creía que existían tantos azufres, sales y mercurios como cuerpos en la naturaleza.

Como se ve, el mundo renacentista de Paracelso es un mundo mágico, espiritual, que está muy lejos de las características de racionalización y matematización que se atribuyen a la ciencia moderna surgida tras la revolución científica. Piensa que el verdadero conocimiento de la naturaleza no es de carácter lógico o racional. El verdadero conocimiento de un objeto se adquiere gracias a la unión del cuerpo astral del hombre con el sustrato espiritual que caracteriza al objeto, obteniéndose entonces una certeza de índole intuitiva. Tal unión era posible gracias a que todos los cuerpos están de alguna manera representados en el interior del hombre; éste es una réplica del cosmos.

Figura 9.3. El químico como observador de la naturaleza. De J. B. van Helmont. *Opera omnia* (1682).

Pese a esto, la influencia de Paracelso y sus seguidores fue muy notable en la revolución científica. No ya sólo en el importante campo de la medicina, sino a un nivel más general. Paracelso supuso el rechazo a la autoridad de los clásicos (de hecho sus contemporáneos lo vieron como la cabeza de este movimiento de ruptura con la Antigüedad) y la introducción de la observación y la experiencia como único método de adquisición de conocimiento sobre una naturaleza que ahora se consideraba opaca a la razón humana.

Es imposible dar cuenta aquí de todas las complejidades del pensamiento de Paracelso y de aquellos que, como Joan Baptista van Helmont, sufrieron su influencia. Van Helmont desarrolló su trabajo en la primera mitad del siglo XVII, proponiendo una nueva teoría de la materia, de la que sólo mencionaremos que el agua era el elemento fundamental. Pensaba que la interpretación de la naturaleza en términos matemáticos era inapropiada; sin embargo, usaba ampliamente de la balanza y de los experimentos cuantitativos. Para probar que las plantas están formadas de agua, realizó una influyente prueba; tomó un sauce, al que pesó, y lo plantó en una cierta cantidad de tierra, que también pesó. Pasó cinco años regándolo. Al cabo de los mismos, el árbol había aumentado notablemente de tamaño y peso, pero no había disminuido sensiblemente, en cambio, el peso de la tierra en la que fuera plantado.

Van Helmont fue también el primero en identificar y describir los gases, estudiando las substancias volátiles que se producían en la combustión de diversas substancias y en algunas reacciones químicas. Los denominó también «espíritus silvestres», pues tenían una naturaleza volátil e invisible. Los interpretó, dentro de su filosofía, como los portadores de las cualidades vitales específicas de los cuerpos, como la esencia de los mismos cuerpos en su forma más pura.

9.4. Robert Boyle y la filosofía mecánica.

En la segunda mitad del seiscientos la filosofía mecánica sustituyó al animismo renacentista, aunque no sin dejar que éste la influyese. Descartes desterró la concepción de una materia activa, afirmando que el mundo sólo estaba compuesto de corpúsculos y movimiento. Las antiguas cualidades de los cuerpos que se hacían patentes a los sentidos debían explicarse ahora de una forma plenamente racional recurriendo a las distintas figuras, tamaños y movimientos de las partículas de una materia universal. Al margen de si se admitía, con el mismo Descartes, la reducción de la materia a la extensión, o si se tomaba partido, con Gassendi, por los átomos indivisibles y el vacío, la causa de todos los fenómenos se buscaba en este mecanismo que, aunque oculto a nivel sensorial, era plenamente accesible a la razón.

La química no escapó a la influencia de la nueva filosofía de la naturaleza. En esos momentos, las actividades dentro de esta área se repartían heterogéneamente entre los alquimistas, fuertemente influídos por la mística paracelsista, y los iatroquímicos, herederos asimismo de Paracelso; éstos practicaban una química al servicio de la medicina que, apenas abrigada por matices teóricos, consistía más bien en una técnica volcada hacia la elaboración de compuestos medicinales específicos y la búsqueda de otros nuevos. En cualquier caso, ninguna de ambas corrientes podía formar parte propiamente de las nuevas corrientes mecanicistas.

En Inglaterra, Robert Boyle, quien precisamente acuñó el término de «filosofía corpuscular», se propuso reducir todos los fenómenos químicos a la nueva filosofía natural, integrándolos dentro de ella como una parte destacada. En su *Sceptical Chymist* (1661), atacó tanto las ideas escolásticas como las concepciones paracelsistas sobre la composición de la materia.

Aristóteles había afirmado que la composición de los cuerpos mixtos era uniforme; cualquiera de sus partes, por pequeña que fuese, debía ser igual al todo. Es decir, que cuando dos cuerpos se combinaban perdían totalmente su individualidad, dando lugar a un producto enteramente nuevo. Esto había sido sustituido por la idea de que los compuestos se hallaban formados por finos corpúsculos de los cuatro elementos que los integraban, cuya identidad permanecía inmutable. Se creía, además (y esto también rezaba para los tres principios de Paracelso) que todos los elementos (o, en su caso, todos los principios) intervenían, en mayor o menor proporción, en la composición de todos los cuerpos. Así que aunque hubiese pocos elementos o principios fundamentales, tomando en cuenta todas las infinitas variaciones de proporción, el número de productos químicos resultaba infinito. (Recordemos que el mismo Paracelso había afirmado que existían tantos azufres, sales y mercurios como compuestos).

De modo que no había ningún compuesto químico de entre los que se manipulaban que se reconociese como universal (desde luego, no todos

tenían el mismo grado de pureza), y era preciso indicar la fuente de la que procedía el producto si se deseaba que el experimento o reacción química en cuestión pudiese reproducirse adecuadamente por otros. En tales circunstancias, toda clasificación mínimamente detallada de los compuestos resultaba, más que altamente problemática, impensable. Más bien lo que se catalogaba era el conjunto de procedimientos empleados para elaborar la variedad de compuestos de aplicación en medicina.

La teoría se superponía a estas actividades empíricas. Los compuestos se analizaban, esto es, se resolvían en sus componentes, por lo general, mediante la acción del calor. Y los resultados se interpretaban vagamente en términos de elementos fundamentales o de principios. Boyle puso en duda la utilidad del análisis por el fuego para alcanzar los elementos últimos de la materia y, como buen baconiano, mostró que, en muchos casos, éste no daba el número de elementos requeridos y que, aún más, los productos del análisis eran a veces distintos si se alteraban las condiciones (distintas tem-

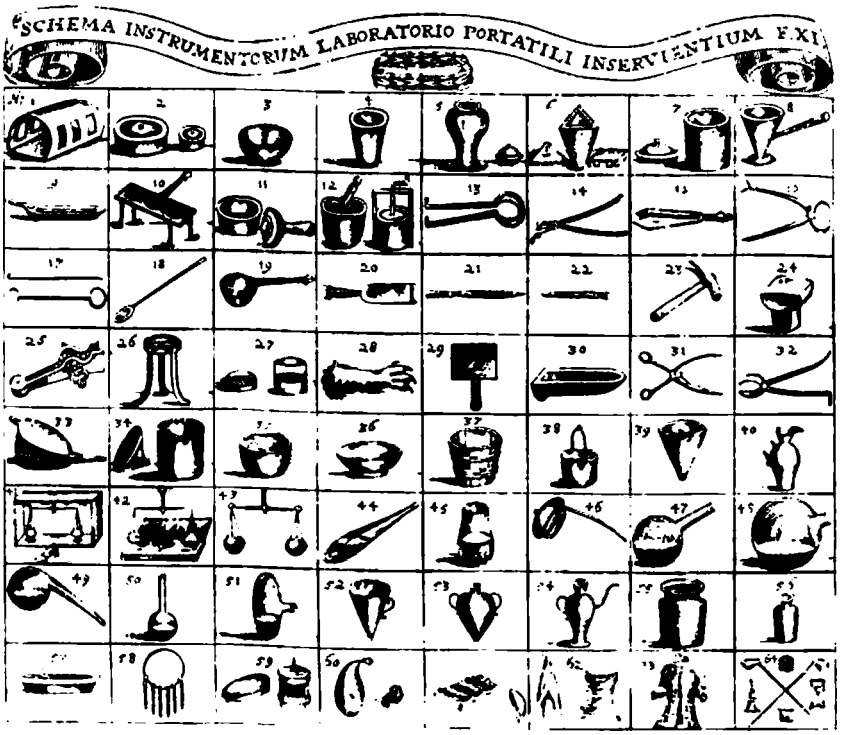


Figura 9.4. Instrumentos de un laboratorio químico portátil a fines del siglo XVII. De J. Becher, *Tripus hermeticus* (1689).

peraturas, recipientes abiertos o cerrados, etc). Además, todavía estos productos diferían ampliamente entre sí. Interpretando la descomposición de una determinada substancia en términos de los tres principios se obtenía una sal, un azufre y un mercurio. Pero la «sal» resultante de esta descomposición, como Boyle subrayó, podía tener unas propiedades químicas bien distintas de la «sal» obtenida en la descomposición de otra substancia distinta. Para él, estos productos no eran ni elementos ni principios, sino cuerpos mixtos a su vez. Y, aunque no denegaba la posibilidad de que, por cualquier procedimiento adecuado, se pudiesen llegar a obtener verdaderas substancias homogéneas y elementales, pensaba que esto se hallaba lejos de poder lograrse con las procedimientos entonces al uso.

Boyle era escéptico respecto de la posibilidad de alcanzar un conocimiento verdadero sobre las causas de los fenómenos. Lejos de adoptar el camino al ateísmo que los piadosos británicos veían en la filosofía mecánica continental, se alineaba entre ellos (y no ciertamente en último lugar) para defender la necesidad de la religión revelada y la omnipotencia de la providencia divina. Sin embargo, como buen corpuscularista (aunque extremadamente circunspecto y cauto), Boyle creía que todo estaba compuesto por partículas de una substancia universal, los «minima naturalia». Pero, a diferencia de los mecanicistas estrictos que veían las causas de los fenómenos químicos exclusivamente en la forma, tamaño y velocidad de los corpúsculos de una materia completamente inerte, pensaba que en ella operaban ciertos principios activos. No era éste un sentir aislado, sino una consecuencia de la pervivencia de las tradiciones animistas en la filosofía natural británica, cuya influencia también se dejará sentir claramente en Newton. De modo que, para Boyle, la actividad química de los corpúsculos de la materia no tenía un origen exclusivamente mecánico.

Siguiendo con el esbozo de sus ideas, por cierto nunca demasiado claramente formuladas, los «minima naturalia» mantenían indemnes sus propiedades en las reacciones químicas. Estas partículas se agregaban en diversos cúmulos o agrupaciones, los «prima mixta». La configuración, la estructura de estos últimos (que en la mayoría de las reacciones químicas actuaban como un todo inseparable) era la responsable de las propiedades químicas de la substancia que aquéllos formaban. Los cambios de cualidades observados en las reacciones se explicaban por uniones o reordenaciones de los prima mixta.

Se trataba de ideas un tanto vagas, marcadas por un escepticismo que las distinguía de las sostenidas por otros mecanicistas continentales, mucho más estrictos en la ontología de materia y movimiento. Este era el caso, por ejemplo, de Nicolás Lémery, quien en su influyente *Cours de chymie* (1675) proponía una explicación para la reacción entre los ácidos y los álcalis basada en la figura de sus partículas: las de los primeros eran puntiagudas, las de los segundos porosas, de modo que al producirse la reacción las unas

ensartaban a las otras. Lo que buscaba este tipo de mecanicismo químico era la explicación de las propiedades de las distintas substancias deduciéndolas de unas imaginarias propiedades de sus partículas constituyentes. Así se podía explicar cualquier cosa, pero difícilmente se podía llegar a formular una verdadera teoría química.

El escepticismo de Boyle le prevenía de llegar a estas sutilezas. La filosofía corpuscular se planteaba en un plano más general, hallándose lejos de constituir una teoría que condujese a predicciones contrastables en el laboratorio. Boyle, consciente de esto, puso en práctica con seriedad y minuciosidad la propuesta empírica baconiana, estudiando las propiedades de los productos del análisis químico y estableciendo distintas pruebas para distinguirlos entre sí. Y en esto, precisamente, destacó sobremanera. Hasta la fecha, estos productos se habían identificado cualitativamente a través de propiedades físicas como la solidez o la volatilidad. Ahora se alcanzaba con Boyle un mayor nivel de sofisticación en la individualización de las substancias, precisamente en función de sus propiedades químicas.

La aparición de la *Optica* de Newton supuso un paso adelante en este programa. Allí se remataba la obra de Boyle sugiriendo la existencia de fuerzas atractivas y repulsivas de corto alcance entre los corpúsculos de materia, que podían dar cuenta de su agregación y de la causa de la diversidad de los fenómenos químicos. Estas fuerzas, sin embargo, y a diferencia de lo que había logrado Newton con la gravitación universal, no resultaban cuantificables. De modo que los químicos newtonianos se consagraron, a lo largo del setecientos, a elaborar tablas de afinidades, que mostraban la capacidad de las distintas substancias de desplazarse unas a otras en un compuesto. Es decir, que si la substancia A es más afín a B que la substancia C, entonces se produce la reacción $B + AC \rightarrow AB + C$.

9.5. Vuelta a los principios: el flogisto.

Por sugerente que fuese el marco conceptual elaborado por la escuela británica de filosofía natural, no constituía, como se dijo, una verdadera teoría química. No había forma de establecer en él una clara relación entre los corpúsculos de la materia y sus propiedades sensibles que pudiese llevar a predicciones contrastables. Se precisaba tanto de una definición realmente operativa de elemento químico como de principios unificadores que vertebrasen la gran diversidad de los fenómenos químicos. En tales circunstancias no es extraño que resurgiesen, renovadas, las antiguas ideas.

El retorno a los elementos de la tradición esencialista vino de la mano de Georg Ernst Stahl, que comenzó a publicar su obra en los últimos años del seiscientos. La base de su teoría estaba en las ideas de Joachim Becher, expuestas a fines de la década de los sesenta. Estas ideas fueron integradas

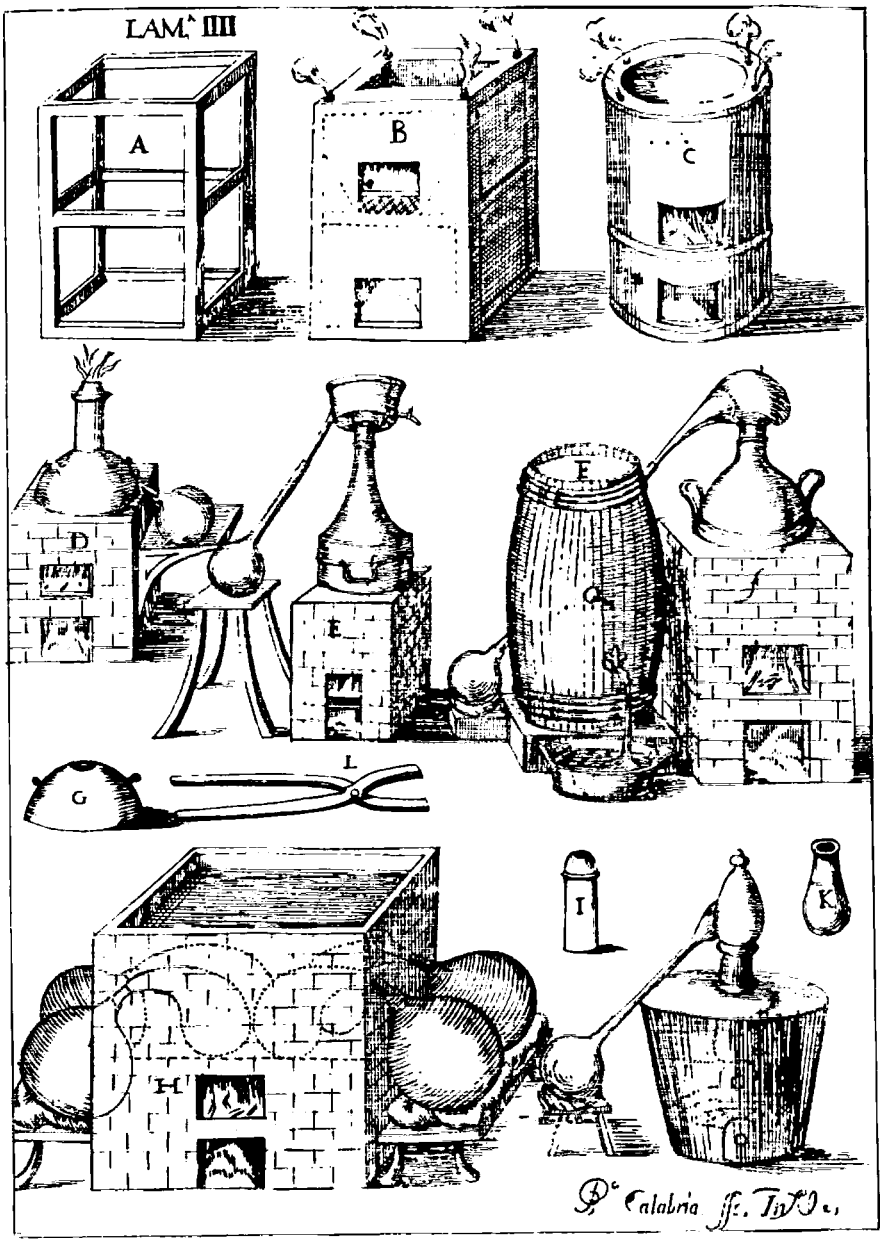


Figura 9.5. Hornos e instrumentos químicos. De Félix Palacios. *Palestra pharmacéutica chymico-galénica* (1706).

por Stahl en una nueva propuesta que buscaba recoger lo que de válido contenían, a su juicio, otras teorías.

Stahl coincidía, con los atomistas, en que todos los cuerpos de la naturaleza estaban formados por átomos dotados de ciertas cualidades específicas e inmutables. Estas cualidades podrían explicarse quizás por la geometría de estas partículas; sin embargo, a este nivel, considera ociosas, por inverificables, todas las hipótesis. Mas áun, cree que es imposible encontrar las substancias elementales homogéneas constituidas por un solo tipo de átomos. Tales substancias no se encuentran en la naturaleza pues, combinándose siempre los átomos para formar otros átomos o corpúsculos mixtos, pasan de un mixto a otro en los fenómenos químicos sin quedarse jamás aislados. De aquí que el análisis de las distintas substancias jamás pueda conducir a resolverlas en sus constituyentes elementales. Aquí Stahl considera distintos grados de composición. Los átomos elementales se combinan para formar mixtos. La asociación de estas partículas mixtas, a su vez, da lugar a los compuestos; y éstos, a su vez, pueden combinarse con otros mixtos o compuestos, y así sucesivamente. Cuanto mayor sea el nivel de composición de una sustancia, más fácil será resolverla en sus componentes inmediatos.

Los átomos elementales, siguiendo a Becher, se dividen en tres clases: los de la tierra, el agua y el aire. Este último no tiene capacidad química, es decir, no constituye una parte integrante de los cuerpos compuestos. Estos se hallan formados sólo de agua y de tierra. A su vez, hay tres especies de tierra: una vitrificable, otra mercurial, y otra sulfurosa (que recuerdan a la tria prima paracelsiana). La tierra sulfurosa constituye el principio de la inflamabilidad, siendo un elemento común a todos los cuerpos combustibles al que Stahl denominó flogisto.

El flogisto se convirtió en un principio unificador, al explicarse a través del mismo tanto la calcinación de los cuerpos metálicos como la combustión de los cuerpos orgánicos, fundiéndose en un único proceso. En la calcinación y en la combustión se produce una pérdida de flogisto. Según Stahl, los metales están compuestos por una tierra y por flogisto. Cuando un metal se calcina al aire libre pierde su flogisto, dando lugar a una escoria o cal, distinta en cada caso. Cuando esta cal se calienta con carbón vegetal se reconvierte en el metal, gracias a la recuperación del flogisto, cedido por la combustión del carbón. El aire, aunque químicamente inerte, juega un papel esencial, pues absorbe el flogisto; cuando está saturado, la combustión cesa.

El flogisto era, pues, algo que se perdía en la combustión. Sin embargo, como Boyle había mostrado, en la calcinación de un metal la cal resultante pesaba más que el metal original. Esta fue una de las principales dificultades que se presentaron a la teoría, y que se trató de resolver, entre otros, por el expediente de otorgar al flogisto un peso negativo.

Por su parte, la amplia variedad de reacciones químicas se explicaba a través del concepto de afinidad, de la atracción de lo similar por lo similar. Dos sustancias reaccionan por la afinidad de sus elementos. Así, el estudio de las afinidades, antes que el análisis y la síntesis, se veía como el medio por excelencia para la indagación de la composición de los cuerpos.

Aunque tardó medio siglo en difundirse, la teoría del flogisto, en una u otra versión, fue en general bien acogida por cartesianos, atomistas y newtonianos, al encontrarse en ella elementos de cada una de estas filosofías. Sin embargo, entre tanto se fueron acumulando nuevos hechos, especialmente en el desarrollo de las investigaciones británicas sobre los gases, que evidenciaron la diversa constitución del aire. También el agua se descompuso en sus elementos componentes, hidrógeno («generador de agua») y oxígeno. Gracias a la identificación de este último elemento como el agente responsable de la combustión, a la clara definición del principio de la conservación de la masa en los procesos químicos, a la sustición del análisis cualitativo por el cuantitativo, y a una definición verdaderamente operativa de ele-

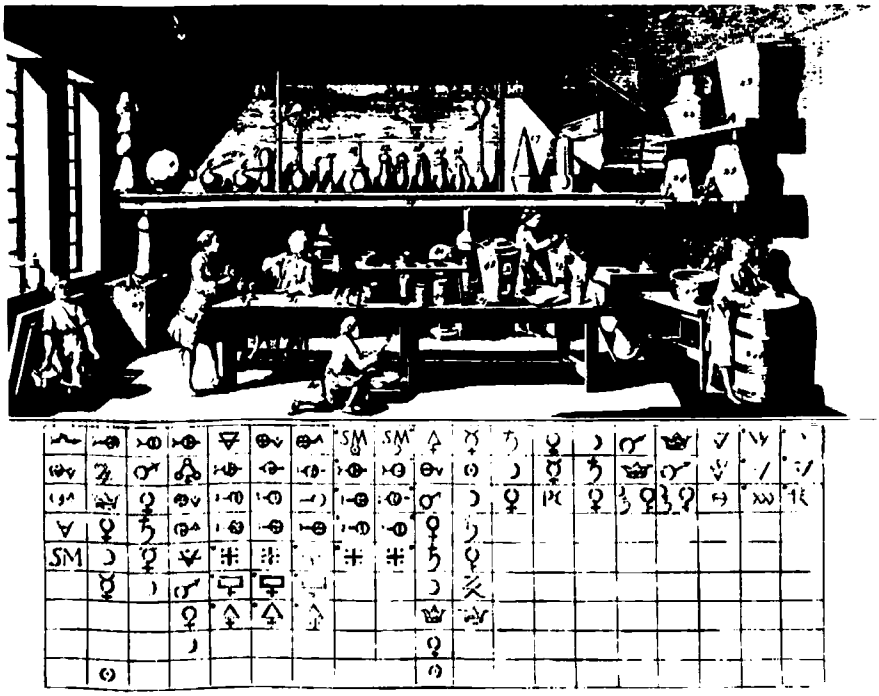


Figura 9.6. Laboratorio químico, de la *Encyclopédie* de Diderot y D'Alembert. Abajo se muestra una tabla de afinidades: los distintos símbolos empleados representan las diferentes substancias.

mento como el último resultado del análisis, entre otros factores menos destacados, la química iba a conocer, de la mano de Lavoisier, en la última parte del setecientos, lo que muchos historiadores califican de su postergada revolución científica. Esta, sin embargo, desarrollada en un siglo y un clima intelectual distintos, resultaba bastante menos deudora que las ciencias físico-matemáticas del nuevo programa de indagación de la naturaleza abrazado por los científicos del seiscientos. Por más que a primera vista se puedan encontrar semejanzas (siempre hay precursores para todo), un abismo separa las concepciones del atomismo químico de un Boyle del que hoy podemos encontrar en cualquier texto elemental de química.

10.

Apéndice: Selección de textos

Texto 1

Al Santísimo Señor Pablo III, Pontífice Máximo

Prefacio de Nicolás Copérnico a los libros sobre las revoluciones

Santísimo Padre, puedo estimar suficientemente lo que sucederá en cuanto algunos adviertan, en estos libros míos, escritos acerca de las revoluciones de las esferas del mundo, que atribuyo al globo de la tierra algunos movimientos, y clamarán para desaprobarme por tal opinión. Pues no me satisfacen hasta tal punto mis opiniones, como para no apreciar lo que otros juzguen de ellas. Y aunque sé que los pensamiento del hombre filósofo están lejos del juicio del vulgo, sobre todo porque su afán es buscar la verdad en todas las cosas, en cuanto esto le ha sido permitido por Dios a la razón humana; sin embargo, considero que debe huirse de las opiniones extrañas que se apartan de lo justo. Y así, al pensar yo conmigo mismo, cuán absurdo estimarían el 'ακρόαμα [esta cantinela] aquellos que, por el juicio de muchos siglos, conocieran la opinión confirmada de que la tierra inmóvil está colocada en medio del cielo como su centro, si yo, por el contrario, asegurara que la tierra se mueve; entonces largo tiempo dudé en mi interior, si dar a la luz mis comentarios escritos sobre la demostración de ese movimiento o si, por el contrario, sería suficiente seguir el ejemplo de los Pitagóricos y de algunos otros, que no por escrito, sino oralmente, solían trasmitir los misterios de su filosofía únicamente a amigos y próximos, como testifica Lysis en su carta a Hiparco. Pero a mí me parece que no hicieron esto, como juzgan algunos, por un cierto recelo a comunicar sus doctrinas, sino para que asuntos tan bellos, investigados con mucho estudio por los grandes

hombres, no fueran despreciados por quienes les da pereza el dedicar algún trabajo a las letras, excepto a lo lucrativo, o si, siendo excitados por las exhortaciones y el ejemplo de otros hacia el estudio liberal de la filosofía, por la estupidez de su ingenio se movieran entre los filósofos como los zánganos entre las abejas. Considerando, pues, conmigo mismo estas cosas, el desprecio que debería temer a causa de la novedad y lo absurdo de mi opinión, casi me empujaron a interrumpir la obra ya organizada.

Pero los amigos me hicieron cambiar de opinión, a mí que durante tanto tiempo dudaba y me resistía. Entre ellos fue el primero Nicolás Schönberg, cardenal de Capua, célebre en todo género de saber. Próximo a él estuvo mi muy querido e insigne Tiedemann Giese, obispo de Culm, estudiosísimo de las letras sagradas, así como también de todo buen saber. Este me exhortó muchas veces y, añadiendo con frecuencia los reproches, insistió para que publicara este libro y lo dejara salir a la luz, pues retenido por mi había estado en silencio, no sólo nueve años, sino ya cuatro veces nueve. A lo mismo me impulsaron otros muchos varones eminentes y doctos, exhortándome para que no me negara durante más tiempo, a causa del miedo concebido, a presentar mi obra para la común utilidad de los estudiosos de las matemáticas. Decían que, cuanto más absurda pareciera ahora a muchos esta doctrina mía sobre el movimiento de la tierra, tanta más admiración y favor tendría después de que, por la edición de mis comentarios, vieran levantada la niebla del absurdo por las clarísimas demostraciones. En consecuencia, convencido por aquellas persuasiones y con esta esperanza, permití a mis amigos que hiciesen la edición de la obra que me habían pedido tanto tiempo.

Y quizá, tu Santidad no admirara tanto el que me haya atrevido a sacar a la luz estas lucubraciones, después de tomarme tanto trabajo en elaborarlas, como el que no haya dudado en poner por escrito mis pensamientos sobre el movimiento de la tierra. Pero lo que más esperará oir de mi es, qué me pudo haber venido a la mente para que, contra la opinión recibida de los matemáticos e incluso contra el sentido común, me haya atrevido a imaginar algún movimiento de la tierra. Y así, no quiero ocultar a tu Santidad, que ninguna otra cosa me ha movido a meditar sobre el establecimiento de otra relación [estructura] para deducir los movimientos de las esferas del mundo, sino el hecho de comprender que los matemáticos no están de acuerdo con las investigaciones. Primero, porque estaban tan inseguros sobre el movimiento del Sol y de la Luna, que no podían demostrar ni observar la magnitud constante de la revolución anual. Después, porque al establecer los movimientos, no sólo de aquéllos, sino también de las otras cinco estrellas errantes, no utilizan los mismos principios y supuestos, ni las mismas demostraciones en las revoluciones y movimientos aparentes. Pues unos utilizan sólo círculos homocéntricos, otros, excéntricos y epiciclos, con los que no consiguen plenamente lo buscado. Pues los que confían en los homocéntricos, aunque hayan demostrado algunos pocos movimientos de los que pueden componerse, no pudieron deducir de ello nada tan seguro que respondiera, sin duda, a los fenómenos. Mas los que pensaron en los excéntricos, aunque en gran parte parecían haber resuelto los movimientos

aparentes por medio de cálculos congruentes con ellos, sin embargo admitieron entre tanto muchas cosas que parecen contravenir los primeros principios acerca de la regularidad del movimiento. Tampoco pudieron hallar o calcular partiendo de ellos lo más importante, esto es, la forma del mundo y la simetría exacta de sus partes, sino que les sucedió como si alguien tomase de diversos lugares manos, pies, cabeza y otros miembros auténticamente óptimos, pero no representativos en relación a un solo cuerpo, no correspondiéndose entre sí, de modo que con ellos se compondría más un monstruo que un hombre. Y así, en el proceso de demostración que llaman μέθοδον [método] olvidaron algo de lo necesario, o admitieron algo ajeno, o que no pertenece en modo alguno al tema. Y esto no les hubiese sucedido en modo alguno, si hubieran seguido principios seguros. Pues si las hipótesis supuestas por ellos no fueran falsas, todo lo que de ellas se deduce se podría verificar sin lugar a dudas. Y aunque lo que ahora digo es oscuro, en su lugar se hará claro.

En consecuencia, reflexionando largo tiempo conmigo mismo sobre esta incertidumbre de las matemáticas transmitidas para calcular los movimientos de las esferas del mundo, comenzó a enojarme que a los filósofos, que en otras cuestiones han estudiado tan cuidadosamente las cosas más minuciosas de ese orbe, no les constará ningún cálculo seguro sobre los movimientos de la máquina del mundo, construida para nosotros por el mejor y más regular artífice de todos. Por lo cual, me esforcé en releer los libros de todos los filósofos que pudiera tener, para indagar si alguno había opinado que los movimientos de las esferas eran distintos a los que suponen quienes enseñan matemáticas en las escuelas. Y encontré en Cicerón que Niceto fue el primero en opinar que la tierra se movía. Después, también en Plutarco encontré que había algunos otros de esa opinión, cuyas palabras, para que todos las tengan claras, me pareció bien transcribir.

«Algunos piensan que la tierra permanece quieta, en cambio Filolao el Pitagórico dice que se mueve en un círculo oblicuo alrededor del fuego, de la misma manera que el Sol y la Luna. Heráclides el del Ponto y Ecfanto el Pitagórico piensan que la tierra se mueve pero no con traslación, sino como una rueda, alrededor de su propio centro, desde el ocaso al orto».

En consecuencia, aprovechando esa ocasión empecé yo también a pensar sobre la movilidad de la tierra. Y aunque la opinión parecía absurda, sin embargo, puesto que sabía que a otros se les había concedido tal libertad antes que a mí, de modo que representaban algunos círculos para demostrar los fenómenos de los astros, estimé que fácilmente se me permitía experimentar, si, supuesto algún movimiento de la tierra, podrían encontrarse en la revolución de las órbitas celestes demostraciones más firmes que lo eran las de aquéllos.

Y yo, supuestos así los movimientos que más abajo en la obra atribuyo a la tierra, encontré con una larga y abundante observación que, si se relacionan los movimientos de los demás astros errantes con el movimiento circular de la tierra, y si los movimientos se calculan con respecto a la revolución de cada astro, no sólo de ahí se siguen los movimientos aparentes de aquéllos, sino que también se conectan el orden y magnitud de los astros y de

todas las órbitas, e incluso el cielo mismo; de tal modo que en ninguna parte puede cambiarse nada, sin la perturbación de las otras partes y de todo el universo. De ahí también, que haya seguido en el transcurso de la obra este orden: en el primer libro describiré todas las posiciones de las órbitas con los movimientos que le atribuyo a la tierra, de modo que ese libro contenga la constitución general del universo. Después, en los restantes libros, relaciono los movimientos de los demás astros y de todas las órbitas con la movilidad de la tierra, para que de ahí pueda deducirse en qué medida los movimientos y apariencias de los demás astros y órbitas pueden salvarse, si se relacionan con el movimiento de la tierra. No dudo que los ingeniosos y doctos matemáticos concordarán conmigo, sí, como la filosofía exige en primer lugar, quisieran conocer y explicar, no superficialmente sino con profundidad, aquello que para la demostración de estas cosas he realizado en esta obra. Pero para que tanto los doctos como los ignorantes por igual vieran que yo no evitaba el juicio de nadie, preferí dedicar estas lucubraciones a tu Santidad antes que a cualquier otro, puesto que también en este remotísimo rincón de la tierra, donde yo vivo, eres considerado como eminentísimo por la dignidad de tu orden y también por tu amor a todas las letras y a las matemáticas, de modo que fácilmente con tu autoridad y juicio puedes reprimir las mordeduras de los calumniadores, aunque esté en el proverbio que no hay remedio contra la mordedura de un sicofante.

Si por casualidad hay ματαιολογοι [charlatanes] que, aun siendo ignorantes de todas las matemáticas, presumiendo de un juicio sobre ellas por algún pasaje de las Escrituras, malignamente distorsionado de su sentido, se atrevieran a rechazar y atacar esta estructuración mía, no hago en absoluto caso de ellos, hasta el punto de que condenaré su juicio como temerario. Pues no es desconocido que Lactancio, por otra parte célebre escritor, aunque matemático mediocre, habló puerilmente de la forma de la tierra, al reírse de los que transmitieron que la tierra tiene forma de globo. Y así, no debe parecernos sorprendente a los estudiosos, si ahora otros de esa clase se ríen de nosotros. Las Matemáticas se escriben para los matemáticos, a los que estos trabajos nuestros, si mi opinión no me engaña, les parecerán que aportan algo a la república eclesiástica, cuyo principado tiene ahora tu Santidad. Pues así, no hace mucho, bajo León X, en el Concilio de Letrán, cuando se trataba de cambiar el Calendario Eclesiástico, todo quedó indeciso únicamente a causa de que las magnitudes de los años y de los meses y los movimientos del Sol y de la Luna aún no se consideraban suficientemente medidos. Desde ese momento, dediqué mi ánimo a observar estas cosas con más cuidado, estimulado por el muy preclaro varón D. Pablo, obispo de Fossombrone, que entonces estaba presente en las deliberaciones. Pero lo que he proporcionado en esta materia, lo dejo al juicio principalmente de tu Santidad y de todos los demás sabios matemáticos; y para que no parezca a tu Santidad, que prometo más utilidad en la obra de la que puedo presentar, paso ya a lo construido.

(N. Copérnico, *Sobre las revoluciones de las esferas celestes*.)

Comentario

Copérnico es conocido por haber apartado a la Tierra del centro del mundo, haciéndola girar como un planeta más, aproximadamente en torno al Sol. Este esquema resulta hoy muy familiar, pero en su época era claramente absurdo, pues el sentido común dejaba claro que la Tierra estaba firmemente asentada bajo los pies, sin que se notasen los efectos que usualmente se sentían al desplazarse rápidamente en los vehículos veloces de la época. Por consiguiente es un problema por qué se le ocurrió a Copérnico proponer tal absurdo físico como esquema básico con el que elaborar sus modelos de movimiento planetario. El Prefacio al *De revolutionibus* intenta aclarar este misterio.

Como señalan los dos primeros párrafos, el temor a la desaprobación con que se habría de encontrar al conferir varios movimientos a la Tierra («la novedad y lo absurdo de mi opinión») casi lo llevaron a abandonar sus proyectos. Pero, convencido por sus eruditos amigos, decidió publicar la obra «para la común utilidad de los estudiosos de las matemáticas». Todavía en esta época por *matemáticos* se entendía los astrónomos, puesto que la astronomía no se ocupaba tanto de cuestiones cosmológicas o de física celeste cuanto de la construcción de modelos de datos. Esta referencia a la utilidad para los profesionales, unida a la afirmación que aparece hacia la mitad del último párrafo del Prefacio («Las matemáticas son para los matemáticos»), indican que Copérnico estaba escribiendo para un reducido círculo de profesionales, los astrónomos, que eran los únicos capacitados para comprender sus motivos y razones por encima del absurdo físico captado por el sentir común. Esto es, los movimientos de la Tierra no se afirman como algo interesante por sí mismo que pueda ser independientemente defendible, sino que es algo que viene requerido por la resolución de problemas técnicos dentro del campo de la astronomía matemática. No deja de ser curioso que una tesis con tanto impacto sobre la ciencia, las letras, las artes y la sociedad en general se presentase inicialmente subordinada a problemas muy técnicos y dirigida a media docena de entendidos. Por eso la «revolución copernicana» hubo de ser llevada a su cabal cumplimiento más tarde por obra de Kepler y Galileo en el terreno de la física celeste y terrestre.

Volviendo al hilo principal, en el tercer párrafo Copérnico empieza a exponer las razones que lo llevaron a proponer los movimientos terrestres «contra la opinión recibida de los matemáticos y del sentido común». El motivo básico que lo llevó a ensayar una ordenación de los cuerpos celestes distinta de la geocéntrica fue el fracaso de todas las teorías astronómicas desde el principio de los tiempos. En efecto, en primer lugar ni siquiera han logrado averiguar los movimientos del Sol y la Luna con precisión suficiente para elaborar un calendario que combine el periodo solar con sus estaciones y el periodo lunar que está a la base de la división en semanas,

siendo ambos incomensurables. Como señala en el último párrafo del Prefacio, el Concilio lateranense de 1512-17 había planteado el problema. El equinoccio de primavera, con el que se computa la Pascua, se había ya retrasado diez días en época de Copérnico debido a las malas reglas de intercalación del calendario Juliano; y todo ello porque se había usado una longitud del año 11' 14" más larga de la cuenta, que se habían venido acumulando desde mediados del siglo I. Sin embargo, el problema no pudo resolverse a falta de una adecuada determinación de los periodos lunar y solar, lo que espoleó el interés de Copérnico por la astronomía.

Pero, en segundo lugar, ese fracaso de la astronomía debe atribuirse, según Copérnico, a que hasta ahora no se han respetado los verdaderos principios del movimiento de los astros que proceden de manera circular y uniforme. Peurbach, Regiomontano y Copérnico eran humanistas que estaban en disposición por primera vez en Occidente de leer y entender a los griegos. Copérnico, en particular, no está dispuesto a transgredir los principios griegos de componer las caóticas apariencias a base de movimientos armónicos simples, entre otras razones porque las licencias y trucos oportunistas adoptados por la astronomía ptolemaica no desembocaban en buenos resultados después de tantos siglos de tradición. La discrepancia entre las teorías astronómicas es signo de su inadecuación. Dos son los principales tipos. Quienes, como los aristotélicos andalusíes, había retomado las esferas homocéntricas con movimientos uniformes, salvaban los principios pero no los fenómenos observados, como el propio Aristóteles señalara. Mas quienes recurrían a técnicas más versátiles, como excéntricas y epiciclos, tampoco obtenían un éxito completo a la hora de generar los fenómenos (aunque lo hacían mejor que los otros) y además transgredían los principios. El uso de un ecuante, por ejemplo, significaba que el astro no se mueve uniformemente en torno a su centro. Partiendo de algo falso nunca se está seguro de alcanzar la verdad; ésta sólo emana necesariamente de la verdad, de una ordenación y unos principios verdaderos.

Los modelos llenos de licencias y arbitrariedades convenientes de la tradición ptolemaica producían una cierta imitación de los movimientos astrales, pero sólo un modelo que exprese la verdadera constitución del mundo podía aspirar a generarlos exactamente. Los modelos ptolemaicos suministraban una imagen monstruosa del mundo, pues aunque este o aquel modelo pudiese funcionar aceptablemente desde determinado punto de vista, nada tenían que ver unos con otros y nunca podrían encajar entre sí para suministrar una visión armoniosa de la totalidad. De hecho Copérnico fue el primero capaz de ofrecer un modelo del mundo integrado que era a la vez no arbitrario y técnicamente funcional. A pesar de los grados de libertad que se permitían los modelos ptolemaicos, su eficiencia técnica era más bien pobre, mientras que el sistema copernicano conseguía lo mismo con fuertes restricciones sobre los modelos, derivadas de que todos ellos estaban

conectados a través del movimiento de la Tierra y de las relaciones de orden y distancia no arbitrarias derivadas de la interpretación heliocéntrica de la ecuación de anomalía. Sólo con conceder movimiento a la Tierra se acalaraban gran cantidad de fenómenos que antes aparecían conectados sin razón alguna, como la limitada elongación máxima de los planetas inferiores, la conexión de la retrogradación con la oposición en los superiores y con la conjunción inferior en los inferiores, la variación aparente de los periodos de los superiores, etc. ¿Todas estas armonías, coincidencias y simplicísimas explicaciones acaso no eran signo de que se había dado con el plano real del mundo? «Si las hipótesis supuestas por ellos no fuesen falsas», comenta Copérnico, «todo lo que de ellas se deduce se podría verificar sin lugar a dudas».

Cuando explica a continuación cómo se le ocurrió introducir los movimientos de la Tierra para generar los fenómenos en conjunción con la fidelidad a los principios griegos (de poco había servido transgredirlos) menciona a los pitagóricos. Pero los pitagóricos no sólo constituyeron un antecedente clásico y noble de la tesis del movimiento terrestre; también ofrecieron una filosofía, seguida por Platón en el *Timeo*, según la cual la naturaleza posee una constitución y una estructura geométrica exacta. En versión cristiana, la esencia del mundo es un conjunto de armonías matemáticas derivadas de que el Dios geómetra creo su obra según planos matemáticos. Por consiguiente las aproximaciones mediante licencias y expedientes geométricos ad hoc yerran el camino. El mundo no es algo impreciso y vago que quepa aproximar, sino que es algo exacto cuya estructura y leyes cumple describir realmente. No se trata de «imitar» o «salvar» las apariencias, sino de determinar la estructura que realmente genera los fenómenos.

Animado por esta filosofía y por aquellos ejemplos de aceptación de movimientos terrestres, no tuvo más que ensayar qué se deduciría (ópticamente) de la hipótesis copernicana para descubrir no sólo las explicaciones de las peculiaridades de los movimientos, sino además que el conjunto estaba ordenado y bien tratado, obteniendo «el orden y magnitud de los astros y de todas las órbitas», como ya apuntamos, «de tal modo que en ninguna parte se puede cambiar nada sin la perturbación de las partes y de todo el universo». Si logra lo mismo que Ptolomeo pero con las manos atadas por las ligaduras entre los modelos es porque ha dado con el orden real del cosmos. Ante la revelación de estas armonías y coincidencias, se explica que Copérnico decidiese correr el riesgo de ser criticado por proponer movimientos de la Tierra físicamente absurdos, exponiendo sus razones a los astrónomos capaces de apreciar la simplicidad y atractivo de su sistema para las mentalidades matemáticas renacentistas.

Texto 2

Kepler a Galileo

«Paso ahora contigo a los *nuevos planetas*, tema muy admirable de tu opúsculo, conversando contigo a este respecto sobre unas pocas cosas más de las que señalé al comienzo.

Ante todo, estoy contentísimo de haber nacido en gran medida de nuevo gracias a tus trabajos. Si hubieras encontrado planetas girando en torno a una de las fijas, ya tenía yo reservadas cadenas y cárcel junto a las innumerabilidades de Bruno, o incluso más bien el exilio en aquel infinito. Así pues, me libraste ahora del gran temor que me embargó con las primeras noticias de tu libro provenientes de las expresiones de triunfo de mi enemigo, al señalar que estos cuatro planetas no discurren en torno a una de las fijas, sino en torno al astro de Júpiter.

En verdad, Wackher había concebido de nuevo una gran admiración por aquella temible filosofía que hace tantos años no sólo había introducido conjeturalmente, sino que incluso habría establecido claramente con demostraciones aquello que muy recientemente habría visto Galileo con sus ojos. No sin gran mérito se tornan famosos quienes en similares áreas de la filosofía se adelantan a los sentidos con la razón. ¿Quién no considerará que la nobleza de la doctrina astronómica, que sin haber sacado nunca los pies de Grecia predijo con todo las características de la zona helada, es mayor sea que la experiencia de César al percatarse mediante una clepsidra de que las noches eran en el litoral británico un poco más cortas que las de Roma, sea que la invernada de los belgas en Septentrión, ciertamente asombrosa, aunque imposible sin el conocimiento de esa doctrina? ¿Quién no celebra la fábula de Platón sobre la Atlántida, la de Plutarco sobre las doradas islas más allá de Tule o los versos agoreros de Séneca sobre el futuro descubrimiento de un nuevo orbe, una vez que nos ha sido ofrecido por ese argonauta florentino? El propio Colón hace dudar a sus lectores de si admirar más su ingenio al conjeturar la existencia del nuevo orbe por el soplo de los vientos o el valor de enfrentarse a mares ignotos y a un inmenso océano, junto con la alegría de lograr lo que buscaba.

Es evidente que en mi campo son portentosos Pitágoras, Platón y Euclides, pues basándose en la preeminencia de la razón concluyeron que no podía ocurrir sino que Dios aparejase el mundo tomando como modelo los cinco cuerpos regulares, si bien erraron en el procedimiento. Por el contrario, la alabanza del vulgo será para Copérnico, quien en virtud de un ingenio nada vulgar hizo con todo una descripción del mundo cuasi ocular, sacando sólo a la luz τό ὅτι *. Kepler sigue de lejos a los antiguos y de la visión ocular del sistema copernicano, cual εκ τον ὅτι, asciende a las causas y al to δioti que Platón habría proclamado *a priori*, de arriba abajo, hace ya tantos siglos. Muestra que en el sistema del mundo copernicano se halla plasmada la razón de los cinco cuerpos platónicos. No es ni absurdo ni resultado de la envidia esto de poner a los antiguos por delante de los modernos, sino que lo exige la misma naturaleza de las cosas. En efecto,

mayor es la gloria del arquitecto de este mundo que la de quien lo contempla por más ingenioso que sea, ya que aquél sacó de sí mismo las razones de la construcción, mientras que éste apenas averigua con gran trabajo las razones plasmadas en la obra, por lo que no cabe duda de que quienes conciben en su mente las causas de las cosas antes de que se manifiesten a los sentidos se parecen más al arquitecto que los otros que lucubran acerca de las causas después de ver las cosas. Por tanto, Galileo, no envidiarás a nuestros antecesores la gloria de haber predicho hace tanto tiempo que era necesariamente así eso que tu recientemente dices haber visto con tus ojos».

* Esto es *el cómo* (τό ὅτι) y no el *por qué* (τό διότι)

(J. Kepler, *Conversación con el mensajero sideral.*)

Sugerencias para el comentario

Esta obra de Kepler es una larga carta a Galileo comentando sus descubrimientos astronómicos. En este pasaje habla de los satélites de Júpiter, inicialmente tomados por un sistema planetario de otro sol, lo que hubiera corroborado la filosofía de G. Bruno sobre la infinitud de los mundos.

Es interesante en este texto la digresión sobre la posibilidad de predecir los descubrimientos (como hizo el propio Kepler con la rotación solar). Merece la pena comentar las razones por las que es posible dicha anticipación de los descubrimientos y el juicio que la obra de Copérnico le merece a Kepler. Esto último puede recibir alguna luz de la comparación de los problemas que abordaba Kepler en el *Mysterium cosmographicum* con los planteados por Copérnico.

Texto 3

Prop. VIII

La causa de la reflexión, contra lo que se cree comúnmente, no es el choque de la luz contra las partes sólidas e impenetrables de los cuerpos

Esto aparecerá claro por las siguientes consideraciones. Primero, en el paso de la luz del cristal al aire hay una reflexión tan fuerte como en su paso del aire al cristal, o más bien un poco más fuerte, y muchos grados más fuerte que en su paso del cristal al agua. Con todo, no parece probable que el aire conste de partes más fuertemente refractantes que las del agua o cristal. Pero, aunque se pueda suponer tal cosa, no servirá de mucho, pues cuando se elimina el aire del cristal (mediante la bomba de aire inventada por *Otto*

Gueriet y mejorada y convertida en un instrumento útil por el señor *Boyle*) la reflexión es tan fuerte o más que cuando está junto a él. Segundo, si la luz, al pasar del cristal al aire, incide con una inclinación superior a un ángulo de 40 ó 41 grados, se refleja totalmente y, si incide con una inclinación menor, se transmite en gran medida. Ahora bien, no se ha de imaginar que, con un grado de inclinación determinado, la luz encuentra suficientes poros de aire como para transmitirse en su mayor parte, mientras que con otros grados no se encuentra más que con partes que la reflejan completamente, pues hay que considerar que, al pasar del aire al cristal, por inclinada que sea su incidencia, encuentra suficientes poros en el cristal para transmitirse en gran parte. Si hay quien suponga que no es reflejada por el aire, sino por las partes más superficiales del cristal, sigue enfrentándose a la misma dificultad. Aparte de que tal suposición resulta ininteligible, su falsedad se hará patente poniendo agua en lugar de aire tras alguna de las partes del cristal. En tal caso, a una inclinación dada de los rayos, digamos de 45 ó 46 grados, a la que todos ellos se reflejan cuando el aire está adyacente al cristal, se transmitirán en gran media cuando el agua esté adyacente a él. Todo ello muestra que la reflexión o transmisión depende de la constitución del aire y agua tras el cristal y no del choque de los rayos sobre las partes del cristal [...] Finalmente, si los rayos de luz hubieran de reflejarse por chocar con las partes sólidas de los cuerpos, la reflexión sobre los cuerpos pulimentados no sería tan regular como de hecho es. Efectivamente, al pulimentar un cristal con arena, masilla o trípoli, no ha de pensarse que dichas substancias puedan llevar todas sus menores partículas a un acabado perfecto con el frotamiento y desgaste del cristal, de manera que toda su superficie sea realmente plana o esférica y tengan el mismo aspecto como para formar una superficie igual. Cuanto menores sean las partículas de esas substancias, menores serán las rayaduras mediante las que desgastan y roen el cristal hasta completar su pulimentación. Con todo, nunca serán tan pequeñas como para desgastar el cristal sin producir rozaduras y rayados que rompan las protuberancias. Por tanto, pulimentar no es sino convertir las asperezas en un grano finísimo, de modo que las rayas y rozaduras de la superficie se tornen demasiado pequeñas como para ser visibles. Por consiguiente, si la luz se reflejase al chocar con las partes sólidas del cristal, se dispersaría tanto en el cristal más pulido como en el más burdo. Por tanto, queda en pie el problema de cómo es posible que el cristal pulimentado con substancias que lo rayan pueda reflejar la luz con la regularidad con que lo hace. No hay otro modo de resolver este problema que diciendo que la reflexión de un rayo no se produce por un solo punto de la superficie reflectante, sino por cierta potencia del cuerpo uniformemente difundida por toda su superficie, con la que actúa sobre el rayo sin contacto inmediato. Efectivamente, mostraremos más adelante que las partes de los cuerpos actúan sobre la luz a distancia.

Ahora bien, si la luz se refleja no porque choque con las partes sólidas de los cuerpos, sino por algún otro principio, es probable que todos aquellos rayos que choquen con las partes sólidas del cuerpo no se reflejen, sino que se ahoguen y pierdan en su interior. De lo contrario, habríamos de aceptar dos tipos de reflexiones. Si se reflejasen todos los rayos que chocan con las

partes internas del agua clara o del cristal, estas sustancias presentarían un color neblinoso más bien que una clara transparencia. Para que los cuerpos aparezcan negros, es necesario que muchos rayos sean detenidos, retenidos y perdidos en su interior, no pareciendo probable que los rayos se puedan detener y sofocar si no chocan con sus partes.

De ahí que hayamos de aceptar que los cuerpos son mucho más raros y porosos de lo que normalmente se cree. El agua es diecinueve veces más ligera y, por tanto, diecinueve veces más rara que el oro, y éste es tan raro como para transmitir los efluvios magnéticos con toda facilidad y sin la menor oposición, admitiendo con facilidad al mercurio en sus poros y dejando que el agua pase a su través. En efecto, si se llena de agua una esfera cóncava de oro y se suelda, y si luego se hace una fortísima presión sobre ella, deja que el agua se escurra a través de las paredes, apareciendo por toda la parte exterior en forma de una multitud de pequeñas gotas, como rocío, sin necesidad de romper o reventar el cuerpo del oro, según he sido informado por testigos presenciales. De todo ello hemos de concluir que el oro posee más poros que partes sólidas, por lo que el agua tendrá más de cuarenta veces más poros que partes sólidas. Consiguientemente, quien dé con una hipótesis por la que el agua pueda ser tan rara, a pesar de no ser susceptible de compresión por la fuerza, sin duda podrá hacer con la misma hipótesis que el oro, el agua y los demás cuerpos sean tan raros como desee, de manera que la luz pueda encontrar paso franco a través de las sustancias transparentes.

El imán actúa sin ninguna disminución de su poder sobre el hierro, a través de todos los cuerpos densos que no sean magnéticos y no estén al rojo vivo, como, por ejemplo, el oro, la plata, el plomo, el cristal o el agua. El poder gravitatorio del Sol se transmite a través del vasto cuerpo de los planetas sin disminución alguna, actuando así sobre sus partes hasta el mismo centro, con la misma fuerza y según las mismas leyes que si las partes sobre las que actúa no estuviesen rodeadas por el cuerpo del planeta. Los rayos de luz, sean pequeños cuerpos proyectados o simple movimiento o fuerza propagada, se mueven en líneas rectas y, siempre que un rayo de luz se desvía de su camino rectilíneo por un obstáculo cualquiera, nunca volverá al mismo camino rectilíneo si no es, tal vez, por un accidente muy improbable. Con todo, la luz se transmite en línea recta a grandes distancias a través de los cuerpos transparentes. Es muy difícil de concebir cómo es que los cuerpos pueden tener una cantidad suficiente de poros para producir esos efectos, aunque tal vez no sea totalmente imposible, pues los colores de los cuerpos surgen de las magnitudes de las partículas que los reflejan, como ya quedó explicado. Ahora bien, podemos concebir que las partículas de los cuerpos estén de tal modo dispuestas entre sí, que los intervalos o espacios vacíos entre ellas sean iguales en magnitud a todas ellas juntas, y que esas partículas consten de otras partículas mucho menores que posean tanto espacio vacío entre ellas como partículas menores hay y, a su vez, estas partículas menores consten de otras mucho menores, todas las cuales sean igual a todos los poros o espacios vacíos que hay entre ellas, y así continuamente hasta alcanzar a las partículas sólidas que no tengan poros o espacios vacíos

entre sí. Si un cuerpo de tamaño medio poseyese, por ejemplo, tres de esos grados de partículas, el último de los cuales estuviese formado por partículas sólidas, entonces tal cuerpo poseería siete veces más poros que partes sólidas. Pero, si hubiese cuatro grados tales de partículas, las últimas de las cuales fuesen sólidas, el cuerpo tendría quince veces más poros que partes sólidas. Si hubiese cinco grados, el cuerpo tendría treinta y un veces más poros que partes sólidas. Si hubiee seis grados, tendría sesenta y tres veces más poros que partes sólidas, y así continuamente. Se pueden concebir otras modalidades según las cuales los cuerpos puedan ser extraordinariamente porosos, si bien aún no sabemos cuál es en realidad su trama interna.

(Isaac Newton, *Optica*, Libro II, Parte III, Proposición VIII.)

Sugerencias para el comentario

Téngase en cuenta la oposición de Newton a la filosofía mecanicista, según la cual las interacciones se realizan mediante choques y presiones por contacto. Repárese en dos tesis apoyadas experimentalmente con las que Newton expone su ontología de materia inerte y muy escasa más fuerzas inmateriales a distancia. Discútase el carácter de esos elementos de juicio. Coméntese asimismo el interés de la *Optica* por utilizar las interacciones, especialmente la luz, como medio de explorar la constitución microfísica de los cuerpos.

11.

Bibliografía

CAPITULO I

A. RUPERT HALL, *La revolución científica 1500-1750*. Barcelona: Ed. Crítica, 1985.
C. M. CIPOLLA, *Historia económica de la Europa preindustrial*. Madrid: Alianza Ed., 1981.
P. ROSSI, *Los filósofos y las máquinas*. Barcelona: Ed. Labor, 1966.

CAPITULO II

S. SAMBURSKY, *El mundo físico de los griegos*. Madrid: Alianza Ed., 1990.
S. SAMBURSKY, *El mundo físico a finales de la Antigüedad*. Madrid, Alianza Ed., 1990.
E. GRANT, *La ciencia física en la Edad Media*. México: Fondo de Cultura Económica, 1983.

CAPITULO III

T. S. KUHN, *La revolución copernicana*. Barcelona: Ariel, 1984.
N. R. HANSON, *Constelaciones y conjeturas*. Madrid: Alianza Ed., 1978.
N. COPÉRNICO, *Sobre las revoluciones*. Madrid: Tecnos, 1987.

CAPITULO IV

A. KOESTLER, *Los sonámbulos*. Barcelona: Salvat, 1986.
GALILEO-KEPLER, *El mensaje y el mensajero sideral*. Madrid: Alianza, 1984.
A. ELENA, *Las quimeras de los cielos. Aspectos epistemológicos de la revolución copernicana*. Madrid: siglo XXI, 1985.

CAPITULO V

G. GALILEI, *Diálogo sobre los sistemas máximos*, Buenos Aires: Ed. Aguilar, 1975.
G. GALILEI, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, Madrid: Editora Nacional, 1976.
R. DESCARTES, *Los principios de la filosofía*, Madrid: Alianza Ed. (en preparación).

CAPITULO VI

G. E. CHRISTIANSON, *Newton*, Barcelona: Salvat, 1987.
I. NEWTON, *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Madrid: Alianza Ed., 1987.
I. NEWTON, *El sistema del mundo*, Madrid: Alianza Ed., 1986.
I. B. COHEN, *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas*, Madrid: Alianza Ed., 1983.

CAPITULO VII

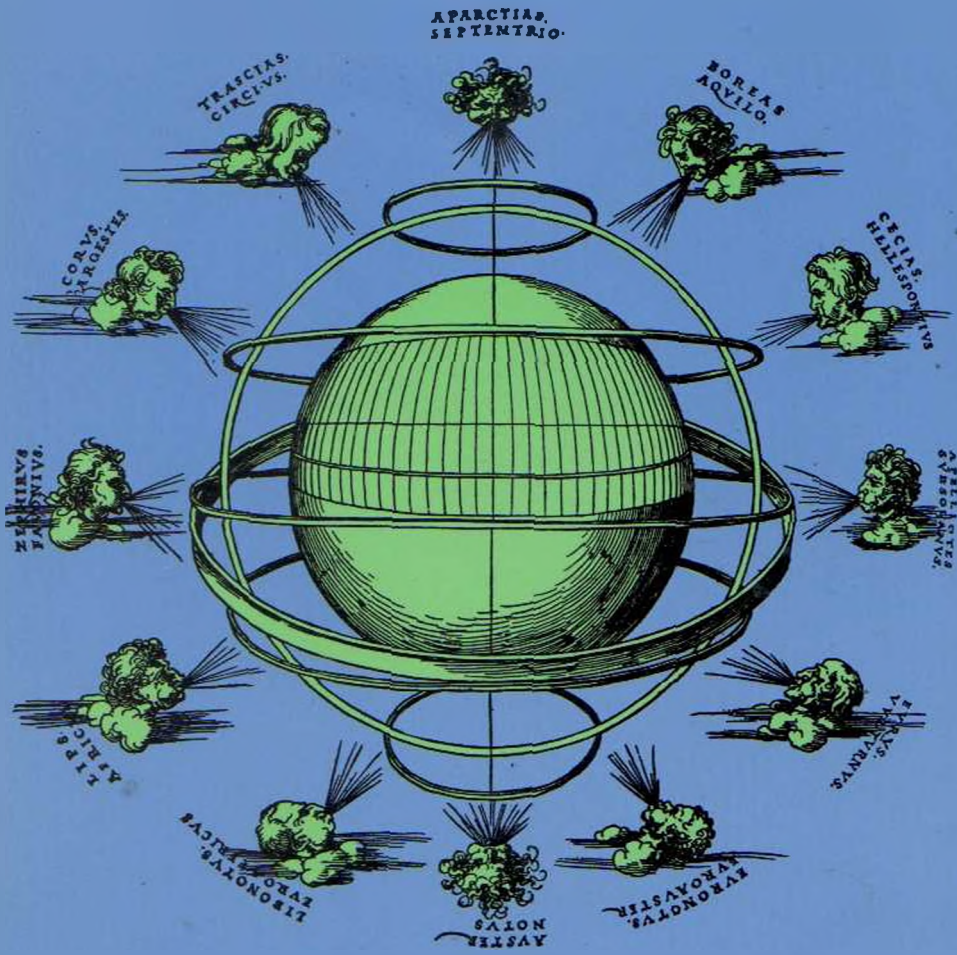
I. NEWTON, *Optica*, Madrid: Alfaguara, 1977.
R. DESCARTES, *Discurso del Método, Dióptrica, Meteoros y Geometría*, Madrid: Alfaguara, 1986.
R. HOOKE, *Micrografía*, Madrid: Alfaguara, 1989.

CAPITULO VIII

R. BOYLE, *Física, química y filosofía mecánica*, Madrid: Alianza Ed., 1985.
R. HOOKE, *Micrografía*, op. cit.
B. PASCAL, *Tratados de pneumática*, Madrid: Alianza, 1984.
G. GALILEI, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, op. cit.

CAPITULO IX

R. BOYLE, *Física, química y filosofía mecánica*, op. cit.
H. M. LEICESTER, *Panorama histórico de la química*, Madrid: Alhambra, 1967.



ISBN 84-7738-126-7

creative commons
LICENCIA CREATIVE COMMONS